

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor :
prof.dr.sc. Željko Bogdan

Student:
Marko Pavičić, *ing*

Zagreb, 2013.

ZADATAK

Tu ide zadatak

IZJAVA:

Ovim izjavljujem da sam diplomski rad radio samostalno, koristeći znanja stečena tokom školovanja te korištenjem navedene literature.

Zahvaljujem se *prof.dr.sc. Željku Bogdanu* na stručnoj pomoći i savjetima bez kojih ovaj rad ne bi bio moguć.

Također se zahvaljujem *dr. Mislavu Čehilu, dipl.ing i mojim roditeljima* bez čije podrške tokom studiranja do ovog rada sigurno ne bi došlo.

Marko Pavičić

SAŽETAK:

U diplomskom radu su prikazane mogućnosti i poboljšanja kombiniranog ciklusa (CC) i kogeneracijskog procesa proizvodnje energije (CHP). U tim procesima toplinska i električna energija se proizvode u istom ciklusu koji omogućava veću termodinamičku iskoristivost za razliku od proizvodnje toplinske i električne energije u dva zasebna ciklusa. Na osnovu matematičkog modela kogeneracijskog postrojenja s kombiniranim ciklusom, slijedi razrada glavnih komponenti postrojenja. Kombinirani procesi s kogeneracijom predstavljaju veliki izazov u smislu konstruiranja više termoeenergetskih blokova za optimalniju koordinaciju proizvodnje električne i toplinske energije. Ta optimizacija mora biti fleksibilna u pogledu trenutnih zahtjeva za energijom od strane potrošača.

U noćnom radu, za razliku od dnevnog rada postrojenja, stvaraju se gubici uzrokovani jeftinom tarifom električne energije, koja je upola manja nego dnevna. Gorivo ima fiksnu cijenu i ne ovisi o tarifi, tako da nailazimo na problem koji je prvenstveno ekonomske prirode. Plinsko postrojenje mora raditi na minimalnom opterećenju za vrijeme jeftine tarife, zbog manje potrošnje goriva, samim time stvara manje gubitke, što je poželjno, ali i manju proizvodnju električne energije, što je nužno. Kod kogeneracijskih postrojenja moramo također obratiti pažnju da zadovoljimo noćne potrebe toplinskog konzuma, s obzirom da postrojenje radi na minimalnom opterećenju.

Tipični problemi efikasnosti kogeneracijskog postrojenja s kombiniranim ciklusom s svojim komponentama dani su u daljnjem tekstu diplomskog rada, gdje su prikazane određene varijante rada u matematičkom modelu.

SUMMARY:

This thesis explains the various possibilities and improvements to the creation of energy by means of combined cycle (CC) and cogeneration process (CHP). Both of these generate thermal and electric energy during the same cycle. This produces greater thermodynamic efficiency as opposed to generating energy in two separate cycles. The configuration of the main facility components follows the mathematical model for the cogeneration process and combined cycle. Building multiple thermal energy blocks to stimulate larger energy production efficiency based on combined cogeneration process, is in itself a challenge. The optimization needs to ensure flexibility due to the current demands of the consumers.

Due to lower energy prices, night tariff at the facility create greater energy losses than day tariff, as much as fifty percent. Fuel costs remain the same regardless of the daily price variation; therefore the problem we face is economic in nature. In order to use up as little fuel as possible, the gas facility needs to function under minimal load while the price is low; which minimizes energy losses but also results in lower energy production, a necessity at this point. The cogeneration facility also needs take into account the consumer demands for thermal energy during night tariff, when the facility functions under minimal load.

The thesis lists a number of typical problems with the efficiency of the cogeneration facility with a combined cycle and its components, along with various methods of operation shown through its mathematical model.

SADRŽAJ:

ZADATAK	II
IZJAVA:	III
SAŽETAK:	IV
SUMMARY:	IV
SADRŽAJ:	V
POPIS SLIKA:	VII
POPIS TABLICA:	VII
POPIS OZNAKA:	VIII

1 UVOD 1**2 MATEMATIČKI MODELI KOMPONENATA POSTROJENJA 6**

2.1 PRORAČUN DIMNIH PLINOVA	6
2.2 MATEMATIČKI MODEL PLINSKO-TURBINSKOG AGREGATA	8
2.3 MATEMATIČKI MODEL KOTLA NA OTPADNU TOPLINU HRSG	12
2.3.1 JEDNADŽBE MATEMATIČKOG MODELA KOTLA NA OTPADNU TOPLINU HRSG:	16
2.3.1.1 Zagrijač mrežne vode:	16
2.3.1.2 Zagrijač kondenzata:	16
2.3.1.3 Otplinjač:	17
2.3.1.4 Niskotlačni krug pare:	18
2.3.1.4.1 NT Pumpa:	18
2.3.1.4.2 NT Ekonomajzer:	18
2.3.1.4.3 NT Isparivač:	19
2.3.1.4.4 NT Pregrijač:	19
2.3.1.5 Visokotlačni krug pare:	20
2.3.1.5.1 VT Pumpa:	20
2.3.1.5.2 Ubrizgavanje vode za hlađenje:	20
2.3.1.5.3 VT Ekonomajzer 1:	21
2.3.1.5.4 VT Ekonomajzer 2:	21
2.3.1.5.5 VT Isparivač:	22
2.3.1.5.6 VT Pregrijač 1:	22
2.3.1.5.7 VT Pregrijač 2:	23
2.4 MATEMATIČKI MODEL PARNE TURBINE	24
2.4.1 JEDNADŽBE MATEMATIČKOG MODELA PARNE TURBINE:	26
2.4.1.1 Visokotlačni stupanj parne turbine:	26
2.4.1.2 Niskotlačni stupanj parne turbine:	26
2.4.1.3 Bilanca mase:	26
2.5 MEĐUOVISNOST MEĐU MODELIMA	27

3 OPIS PROGRAMA 28

3.1 PROGRAMSKO RJEŠENJE	28
3.1.1 TeTo-BLOK L SHEMA	28
3.1.2 PTA	28
3.1.3 GORIVO	28
3.1.4 RAZNO	28
3.1.5 REZULTATI	28
3.1.6 REZULTATI 1 I 2	28
3.1.7 REZULTATI 3	28
3.1.8 TABLICE	28

4	MATEMATIČKI MODELI SIMULACIJE SATNOG RADA TERMoeLEKTRANE	29
4.1	TOPLINSKI KONZUM	29
4.2	MODEL S VELIKOM PLINSKOM TURBINOM	29
4.2.1	OPTEREĆENJE I SNAGA PLINSKE TURBINE	30
4.2.2	SNAGA PARNE TURBINE	30
4.2.3	UKUPNA ELEKTRIČNA SNAGA	30
4.2.4	PROIZVEDENA TOPLINA	30
4.2.5	KORISNOST POSTROJENJA	31
4.2.6	KORISNOST POSTROJENJA S PROIZVEDENOM TOPLINOM	32
4.3	MODEL S DVIJE MALE PLINSKE TURBINE	32
4.3.1	OPTEREĆENJE I SNAGA PLINSKIH TURBINA	32
4.3.2	SNAGA PARNE TURBINE	32
4.3.3	UKUPNA ELEKTRIČNA SNAGA	33
4.3.4	PROIZVEDENA TOPLINA	33
4.3.5	KORISNOST POSTROJENJA	34
4.3.6	KORISNOST POSTROJENJA S PROIZVEDENOM TOPLINOM	35
4.4	MODEL S NOĆNIM RADOM VRŠNIH KOTLOVA	35
4.4.1	OPTEREĆENJE I SNAGA PLINSKE TURBINE	35
4.4.2	SNAGA PARNE TURBINE	35
4.4.3	UKUPNA ELEKTRIČNA SNAGA	35
4.4.4	PROIZVEDENA TOPLINA	35
5	REZULTATI MODELA	36
5.1	POLAZNI PODACI	36
5.1.1	POLAZNI PODACI NA OSNOVU OPTEREĆENJA PLINSKE TURBINE I TOPLINSKE SNAGE	36
5.1.2	POLAZNI EKONOMSKI PODACI	39
5.2	VARIJANTA I	40
5.2.1	POTROŠNJA GORIVA	40
5.2.2	DOBIT IZ TOPLINSKOG KONZUMA	40
5.2.3	DOBIT IZ PROIZVODNJE ELEKTRIČNE ENERGIJE	41
5.2.4	UKUPNA DOBIT	42
5.3	VARIJANTA II	43
5.3.1	POTROŠNJA GORIVA U VRŠNIM KOTLOVIMA	43
5.3.2	POTROŠNJA GORIVA	44
5.3.3	DOBIT IZ TOPLINSKOG KONZUMA	44
5.3.4	DOBIT IZ PROIZVODNJE ELEKTRIČNE ENERGIJE	45
5.3.5	UKUPNA DOBIT	45
6	ANALIZA REZULTATA	50
7	ZAKLJUČAK	51
8	LITERATURA	52

POPIS SLIKA:

SLIKA 1: <i>KOGENERACIJSKO POSTROJENJE S KOMBINIRANIM CIKLUSOM</i>	1
SLIKA 2: <i>SHEMATSKI PRIKAZ ELEKTRIČNE I TOPLINSKE SNAGE S STUPNJEVIMA ISKORISTIVOSTI CHP POSTROJENJA</i>	3
SLIKA 3: <i>PANGLIMA KOGENERACIJSKA POSTROJENJA S KOMBINIRANIM CIKLUSOM (CCPP) TELUK GONG, MALAYSIA</i>	4
SLIKA 4: <i>SHEMA KOGENERACIJSKOG POSTROJENJA S KOMBINIRANIM CIKLUSOM TE-TO ZAGREB BLOK-L</i>	5
SLIKA 5: <i>PRIMJER PLINSKO-TURBINSKOG AGREGATA PTA</i>	8
SLIKA 6: <i>SHEMATSKI PRIKAZ PLINSKO-TURBINSKOG AGREGATA PTA</i>	9
SLIKA 7: <i>SHEMATSKI PRIKAZ PROMJENA STANJA ZRAKA I DIMNIH PLINOVA U PLINSKO-TURBINSKOM AGREGATU PTA</i>	9
SLIKA 8: <i>PRIMJER KOTLA NA OTPADNU TOPLINU HRSG</i>	12
SLIKA 9: <i>TOPLINSKA SHEMA KOTLA NA OTPADNU TOPLINU HRSG</i>	14
SLIKA 10: <i>SHEMATSKI PRIKAZ PROMJENA STANJA VODE U KOTLU NA OTPADNU TOPLINU HRSG</i>	15
SLIKA 11: <i>PRIMJER PARNE TURBINE</i>	24
SLIKA 12: <i>SHEMATSKI PRIKAZ PARNE TURBINE</i>	25
SLIKA 13: <i>PRIKAZ PROGRAMSKOG RJEŠENJA RAZVIJENOG ZA MS EXCEL U VBA PROGRAMSKOM JEZIKU</i>	27
SLIKA 14: <i>RADNO PODRUČJE KOGENERACIJSKOG POSTROJENJA TE-TO ZAGREB-BLOK L</i>	38
SLIKA 15: <i>REZULTATI UKUPNE POTROŠNJE GORIVA ZA MODEL S VELIKOM PLINSKOM TURBINOM</i>	46
SLIKA 16: <i>REZULTATI UKUPNE POTROŠNJE GORIVA ZA MODEL S DVIJE MALE PLINSKE TURBINE</i>	47
SLIKA 17: <i>USPOREDNI REZULTATI UKUPNE POTROŠNJE GORIVA ZA MODELE</i>	48
SLIKA 18: <i>DETALJ PRIKAZA USPOREDNE POTROŠNJE GORIVA 1.1.2009 – 31.1.2009.</i>	49

POPIS TABLICA:

TABLICA 1: <i>TOPLINSKA STANJA VODE U NT I VT DIJELU UTILIZATORA</i>	15
TABLICA 2: <i>TOPLINSKA SNAGA U ZMV PREDANA OD DIMNIH PLINOVA UNUTAR HRSG</i>	36
TABLICA 3: <i>MAKSIMALNA TOPLINSKA SNAGA</i>	37
TABLICA 4: <i>STANDARDNE VRIJEDNOSTI ZA PRORAČUN</i>	39
TABLICA 5: <i>TROŠAK GORIVA</i>	40
TABLICA 6: <i>DOBIT IZ TOPLINSKOG KONZUMA</i>	40
TABLICA 7: <i>DOBIT IZ PROIZVODNJE ELEKTRIČNE ENERGIJE</i>	41
TABLICA 8: <i>UKUPNA DOBIT</i>	42
TABLICA 9: <i>TROŠAK GORIVA U VRŠNIM KOTLOVIMA VK</i>	43
TABLICA 10: <i>TROŠAK GORIVA</i>	44
TABLICA 11: <i>DOBIT IZ TOPLINSKOG KONZUMA</i>	44
TABLICA 12: <i>DOBIT IZ ELEKTRIČNE ENERGIJE</i>	45
TABLICA 13: <i>UKUPNA DOBIT</i>	45
TABLICA 14: <i>USPOREDBA REZULTATA</i>	50

POPIS OZNAKA:

OZNAKA	JEDINICA	OPIS
A	$[m^2]$	površina
A_{ECO}	$[m^2]$	površina stijenke za izmjenjivanje topline u ECO
A_{ISP}	$[m^2]$	površina stijenke za izmjenjivanje topline u ISP
A_{PR}	$[m^2]$	površina stijenke za izmjenjivanje topline u PR
A_{ZK}	$[m^2]$	površina stijenke za izmjenjivanje topline u ZK
A_{ZMV}	$[m^2]$	površina stijenke za izmjenjivanje topline u ZMV
B	$[kg/s]$	maseni protok goriva
C_G	$[€/GJ]$	cijena goriva
C_Q	$[€/MWh]$	cijena toplinske energije
C_{NT}	$[€/MWh]$	cijena jeftine tarife električne energije
C_{DT}	$[€/MWh]$	cijena skuplje tarife električne energije
D	$[kg/s]$	maseni protok vode
D_{HRSG}	$[kg/s]$	maseni protok napojne vode za proizvodnju pare u HRSG
D_{NT}	$[kg/s]$	maseni protok kroz niskotlačni krug pare
D_{VT}	$[kg/s]$	maseni protok kroz visokotlačni krug pare
D_{PNT}	$[kg/s]$	maseni protok kroz zasebni niskotlačni krug pare isparivača i separatora
D_{PVT}	$[kg/s]$	maseni protok kroz zasebni visokotlačni krug pare isparivača i separatora
D_{KP}	$[kg/s]$	maseni protok kondenzata iz zagrijača vode C6
D_P	$[kg/s]$	maseni protok pare iz turbine koja ulazi u otplinjač
D_{otp}	$[kg/s]$	maseni protok vode iz malog otplinjača
D_{ZK}	$[kg/s]$	maseni protok kondenzata kroz HRSG
D_{ZMV}	$[kg/s]$	maseni protok mrežne vode kroz HRSG
D_e	$[€]$	ukupna godišnja dobit
E	$[MWh]$	godišnja proizvedena električna energija
E_{DT}	$[MWh]$	proizvedena električna energija u dnevnoj tarifi
E_{NT}	$[MWh]$	proizvedena električna energija u noćnoj tarifi
E_Q	$[MWh]$	godišnji proizvedeni toplinski konzum
E_{QVK}	$[MWh]$	godišnji proizvedeni toplinski konzum u VK
E_e	$[€]$	godišnja dobit od proizvedene električne energije
E_{DTe}	$[€]$	godišnja dobit od električne energije u dnevnoj tarifi

$E_{NT\epsilon}$	[€]	godišnja dobit od električne energije u noćnoj tarifi
G	[kg/s]	maseni protok dimnih plinova
G_{ϵ}	[€]	godišnji trošak goriva
H	[J/kg]	specifična entalpija
H_{dp}	[J/kg]	specifična entalpija dimnih plinova
H_{otp}	[J/kg]	specifična entalpija vode iz malog otplinjača
H_{KP}	[J/kg]	specifična entalpija kondenzata iz ZMV C6
H_P	[J/kg]	specifična entalpija pare iz turbine koja ulazi u otplinjač
H_v	[J/kg]	specifična entalpija vode
H_{ZK}	[J/kg]	specifična entalpija kondenzata
H_w	[J/kg]	specifična entalpija mrežne vode
H_d	[GJ/kg]	donja ogrjevna vrijednost
k	[W/(m ² K)]	koeficijent prolaza topline
k_{ECO}	[W/(m ² K)]	koeficijent prolaza topline ekonomajzera
k_{ISP}	[W/(m ² K)]	koeficijent prolaza topline isparivača
k_{PR}	[W/(m ² K)]	koeficijent prolaza topline pregrijača
k_{ZK}	[W/(m ² K)]	koeficijent prolaza topline zagrijača kondenzata
k_{ZMV}	[W/(m ² K)]	koeficijent prolaza topline zagrijača mrežne vode
L	[kg/s]	maseni protok zraka
M	[kg/kmol]	molarna masa
m_G	kg/godina	godišnja potrošnja goriva
m_{GVK}	kg/godina	godišnja potrošnja goriva u vršnom kotlu
p	[Pa]	tlak
p_z	[Pa]	tlak zraka
Q	[W]	toplinska snaga
Q_{pl}	[W]	toplinska snaga dovedena primarnom postrojenju
Q_{ECO}	[W]	toplinska snaga ekonomajzera
Q_{ISP}	[W]	toplinska snaga isparivača
Q_{PR}	[W]	toplinska snaga pregrijača
Q_{ZK}	[W]	toplinska snaga zagrijača kondenzata
Q_{ZMV}	[W]	toplinska snaga zagrijača mrežne vode
Q_{ϵ}	[€]	godišnja dobit od proizvedenog toplinskog konzuma
r_i	[%]	molarni udio
T	[K]	apsolutna temperatura
ΔT_{mECO}	[K]	srednja razlika temperature vode i plinova u ECO
ΔT_{mISP}	[K]	srednja razlika temperature vode i plinova u ISP

ΔT_{mPR}	[K]	srednja razlika temperature vode i plinova u PR
ΔT_{mZK}	[K]	srednja razlika temperature vode i plinova u ZK
ΔT_{mZMV}	[K]	srednja razlika temperature vode i plinova u ZMV
t_{ok}	[°C]	temperatura okoliša
t_{dp}	[°C]	temperatura dimnih plinova
t_z	[°C]	temperatura zraka
V	[m ³ /kg]	specifični volumen
W	[W]	snaga
W_{kor}	[W]	korisna snaga
W_{el}	[W]	električna snaga
W_k	[W]	snaga kompresora
W_t	[W]	snaga turbine
W_{Pt}	[W]	snaga parne turbine
W_{NT}	[W]	snaga pumpe vode u niskotlačnom krugu pare
W_{VT}	[W]	snaga pumpe vode u visokotlačnom krugu pare
W_{PtS}	[W]	izentropska snaga parne turbine
W_{PtVTS}	[W]	izentropska snaga visokotlačnog stupnja parne turbine
W_{PtNTS}	[W]	izentropska snaga niskotlačnog stupnja parne turbine
w	[kg/s]	maseni protok vode za ubrizgavanje
x	[-]	broj atoma ugljika
y	[-]	broj atoma vodika
λ	[-]	pretičak zraka
ρ_g	[kg /m ³]	gustoća dimnih plinova
κ	[-]	izentropski eksponent idealnog plina
η_k	[-]	izentropski stupanj iskoristivosti kompresora
η_t	[-]	izentropski stupanj iskoristivosti turbine
η_{el}	[-]	stupanj iskoristivosti električnog generatora
η_{meh}	[-]	mehanički stupanj iskoristivosti
η_{red}	[-]	stupanj iskoristivosti reduktora
η_P	[%]	stupanj iskoristivosti CHP postrojenja
η_{P+Q}	[%]	stupanj iskoristivosti CHP postrojenja s topline
η_P	[-]	stupanj iskoristivosti pumpe
η_{VK}	[%]	stupanj iskoristivosti vršnog kotla
η_{zr}	[-]	stupanj iskoristivosti topline zračenjem

1 UVOD

Proizvodnja električne energije je neophodna za svakodnevno normalno funkcioniranje našeg društva. Uslijed povećane potrošnje i porasta ekološke svijesti u društvu, svakodnevno se javljaju novi i stroži ekološki i eksploatacijski zahtjevi koje treba zadovoljiti prilikom konstruiranja novih elektrana. Proizvodnja električne energije mora se cijelo vrijeme prilagođavati nepredvidivim potrebama za električnom energijom, iz razloga što velika većina potrošača očekuje da im električna energija bude na raspolaganju u bilo koje vrijeme i u bilo kojoj količini.

Kako još uvijek nismo u mogućnosti skladištiti električnu energiju u odgovarajućim količinama, javlja se potreba za trenutnom proizvodnjom električne energije u onoj količini koja je u danom trenutku zahtijevana od strane potrošača.

Mnoga velika postrojenja kao na primjer rafinerije i kemijska industrija koja imaju potrebe za velikim količinama električne energije, dodatno za svoje procese u proizvodnji i potrebe grijanja trebaju također industrijsku paru i potrošnu toplu vodu, a slična potreba za električnom energijom i potrošnom toplom vodom postoji i u zgradarstvu. Odgovor navedenim zahtjevima za istovremenom proizvodnjom električne energije, topline za zagrijavanje mrežne vode i industrijske pare određenog tlaka i temperature je gradnja lokalnih kogeneracijskih elektrana s kombiniranim ciklusom u više manjih blokova (Slika 1).



Slika 1: Kogeneracijsko postrojenje s kombiniranim ciklusom

Naime, kogeneracijska postrojenja s više manjih blokova imaju veću iskoristivost i struktura ih čini termodinamički efikasnijima za uvjete promjenjivog toplinskog konzuma.

Kombinirani ciklus je izvedba termoenergetskog postrojenja koje se sastoji od dva tipa turbine, plinske i parne turbine. Plinsko-turbinski agregat proizvodi zasebno električnu energiju i toplinu koja se ne odvodi u okoliš, već se usmjerava u kotao na otpadnu toplinu, gdje se ista ta toplina dimnih plinova koristi za proizvodnju vodene pare, koja se odvodi u parnu turbinu i proizvodi zasebno električnu energiju. Oduzimanjem iz turbine određenu količinu pare koristimo za potrebe toplinskog konzuma. Razlog zašto se postiže veća iskoristivost postrojenja, odnosno bitno smanjenje gubitaka je tok energije s plinske turbine preko utilizatora na parnu turbinu.

Kombinirani ciklus može se koristiti samo za proizvodnju električne energije ili za kombiniranu proizvodnju električne energije i toplinske energije u vidu zagrijavanja mrežne vode i industrijske pare.

Kogeneracijsko postrojenje s kombiniranim ciklusom se sastoji od sljedećih komponenata:

- Plinska turbina u kojoj se kemijska energija goriva pretvara u mehaničku i termalnu energiju, a zatim se mehanička energija u električnom generatoru pretvara u električnu energiju
- Kotao utilizator u kojemu se iskorištava otpadna termalna energija iz plinske turbine za proizvodnju pare i za zagrijavanje manje količine mrežne vode
- Parna turbina u kojoj se djelomično toplinska energija pare iskorištava za proizvodnju električne energije i oduzimanjem pare iz turbine odvodi za zagrijavanje mrežne vode i za toplinske potrebe kao industrijska para

Termoenergetska postrojenja s kombiniranim ciklusom CC i kogeneracijska postrojenja s kombiniranim ciklusom CHP, ekonomski su opravdana i izvediva u više varijanti, ovisno o tome koje je primarno postrojenje, plinska turbina ili motor s unutrašnjim izgaranjem, odnosno koje se primarno gorivo koristi, plin ili tekuće gorivo. Treba napomenuti da je odabir primarnog postrojenja prvenstveno povezan sa potrebnom snagom.

Upotreba primarnog postrojenja cijelog sistema koji koristi plinske motore donosi sa sobom neke prednosti:

- visoku električnu korisnost do 40%
- visoku ukupnu električnu korisnost preko 50%
- visoku ukupnu iskoristivost postrojenja s proizvedenom toplinom od 85% do 95%
- niske emisije zbog korištenja čistog prirodnog plina s kombinacijom potpunog izgaranja i korištenja katalizatora u procesu obrade dimnih plinova

Međutim, plinski motori su pogodni za potrebe malih snaga, a za potrebe srednjih i velikih snaga koristimo plinske turbine.

Prednosti i karakteristike plinskih turbina u kogeneracijskim postrojenjima su sljedeće:

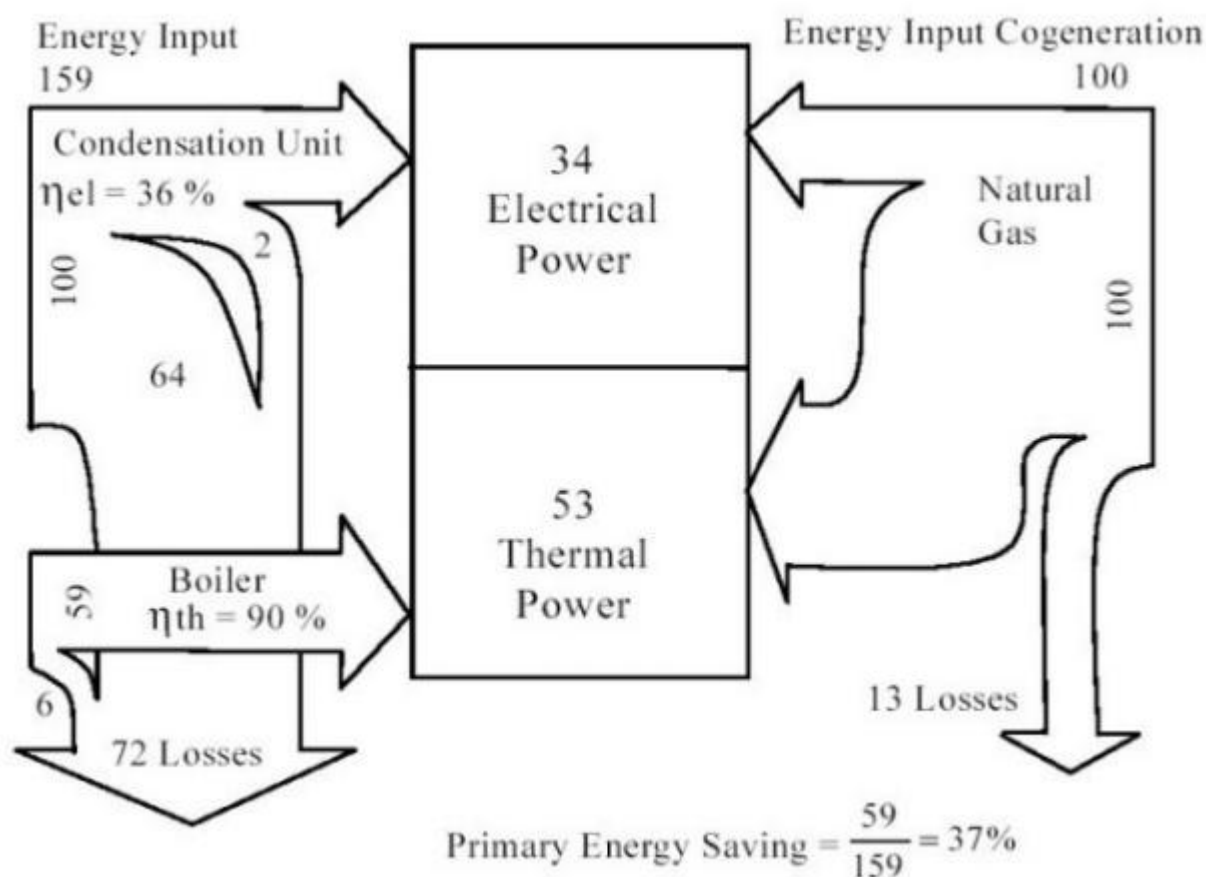
- veliki raspon snaga po modulu 1-300 MW
- visoka izlazna temperatura i veliki maseni protok dimnih plinova
- male varijacije u električnoj snazi
- moguće je koristiti dva ili tri različita goriva

Kogeneracijska postrojenja mogu koristiti i druge vrste goriva kao otpad ili biomasu čijim korištenjem trajno zbrinjavamo otpad. Otpad kao gorivo koje se u ovom slučaju koristi je jeftino ali je pri tome potrebno uložiti dodatne napore u pročišćavanje dimnih plinova kako bismo negativan utjecaj na okoliš sveli na minimum.

Postrojenja koja koriste motore s unutarnjim izgaranjem su mala i pogodna za korištenje na manje i udaljeno smještene lokacije, ali njihovi ispušni plinovi više zagađuju okoliš kao što je to slučaj kod plinskih turbina.

Konvencionalna postrojenja (odvojena proizvodnja električne i toplinske energije) više zagađuju okoliš i nisu ekonomična. U takvim sustavima 60% proizvedene energije se gubi na otpadnu toplinu. Navedena otpadna toplina generirana prilikom proizvodnje električne energije u plinskim motorima s unutrašnjim izgaranjem ili plinskim turbinama moguće je naknadno iskoristiti u kotlu na otpadnu toplinu za proizvodnju pare ili potrošne tople vode.

Paralelna proizvodnja električne i toplinske energije u kogeneracijskim postrojenjima CHP koja koriste plinsko gorivo postižu totalnu iskoristivost i do 90%. Dakle gubici energije su svedeni na minimum. Slika (Slika 2) prikazuje shemu usporedbe proizvodnje električne i toplinske energije u kogeneracijskom i konvencionalnom postrojenju.



Slika 2: Shematski prikaz električne i toplinske snage s stupnjevima iskoristivosti *CHP* postrojenja¹

U shemi je prikazana proizvodnja energije za tvornicu čije su potrebe 34 jedinice električne energije i 53 jedinice toplinske energije usporedno za dva tipa termoenergetskih postrojenja (konvencionalno i kogeneracijsko). Pretpostavka u ovom slučaju je ista iskoristivost proizvodnje električne energije za konvencionalno postrojenje s kondenzacijskom turbinom i kogeneracijsko postrojenje s plinskom

¹ shematski prikaz iz članka; Combined cycle and combined heat and power processes

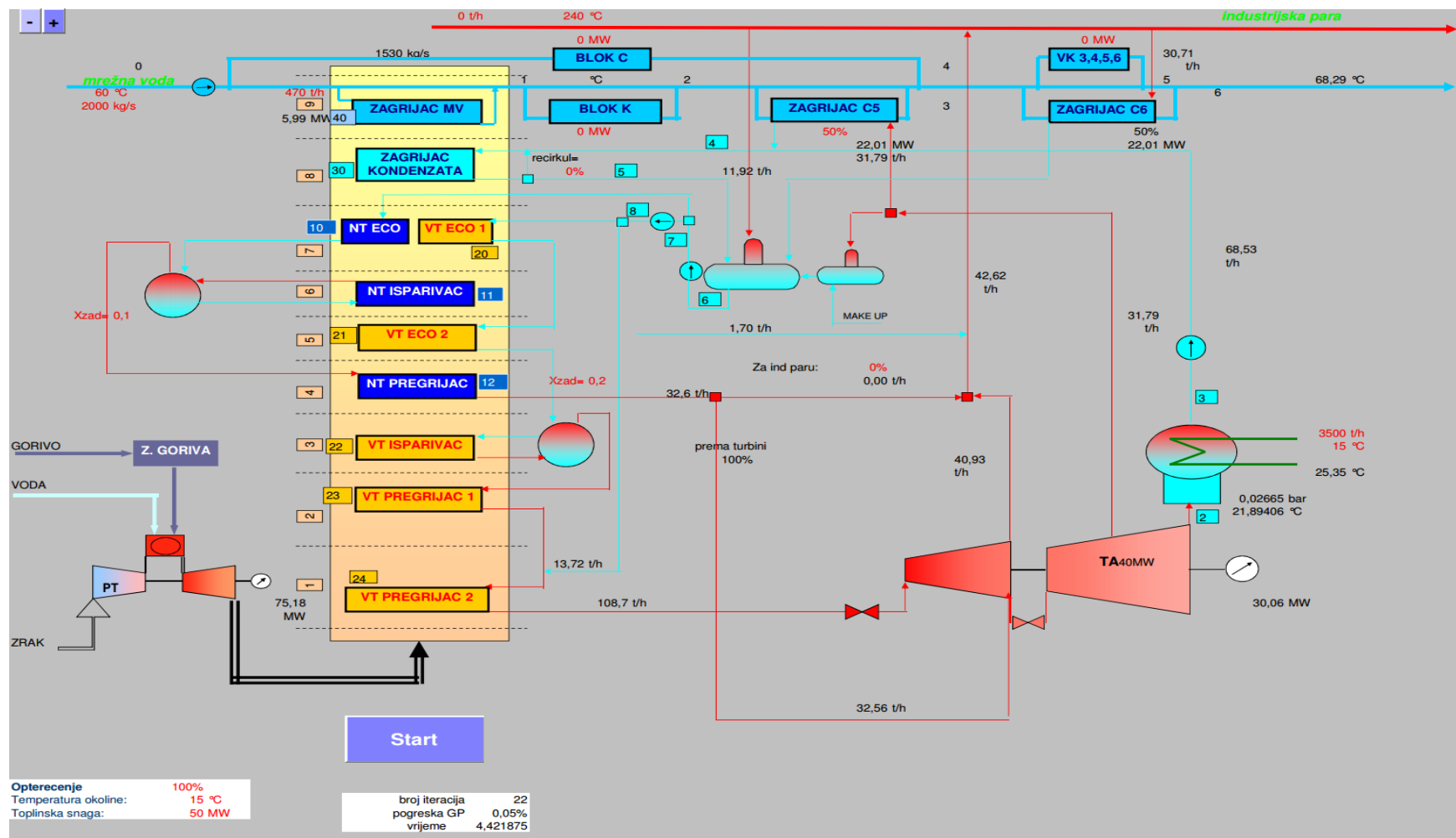
turbinom. Uspoređujući stupanj iskoristivosti CHP (87%) i konvencionalnog (55%) postrojenja, možemo pokazati da proizvodnja u kogeneracijskom postrojenju daje 37% uštede energije.

Osim spomenute ekonomske opravdanosti, moramo napomenuti i ekološku opravdanost korištenja kogeneracijskih postrojenja s kombiniranim ciklusom.

Zagađenje koje nastaje kao posljedica proizvodnje električne i toplinske energije najčešće je direktno proporcionalno količini utrošenog goriva. Iz tog razloga veća iskoristivost goriva direktno utječe na smanjenje zagađenja. S druge strane ukoliko je moguće smanjiti razinu zagađenja moguće je i povećati proizvodnju energije, a da razina zagađenja ostane u prvotnim granicama. Kogeneracijska i postrojenja s kombiniranim ciklusom nam upravo nude tu mogućnost. Navedeno naravno ovisi o danim okolnostima, ali ako se na primjer plinska turbina koja je neophodna zbog brzog puštanja postrojenja u rad, koristi s kotlovskim postrojenjem na ugljen u kombiniranom ciklusu, time možemo smanjiti razinu zagađenja postrojenja na okoliš, tako da kotao na otpadnu toplinu ima dovoljno topline od ispušnih plinova da i dalje proizvodi potrebne količine energije bez izgaranja ugljena u kotlu.



Slika 3: Panglima kogeneracijska postrojenja s kombiniranim ciklusom (CCPP) Teluk Gong, Malaysia



Slika 4: Shema kogeneracijskog postrojenja s kombiniranim ciklusom TE-TO Zagreb blok-L²

² katedra za energetska postrojenja, FSB Zagreb

2 MATEMATIČKI MODELI KOMPONENATA POSTROJENJA

2.1 Proračun dimnih plinova

Izračunavanje volumena zraka potrebnog za izgaranje 1 kg goriva i volumen dimnih plinova nastalih izgaranjem 1 kg goriva te gustoća dimnih plinova.

Za zemni plin kemijski je sastav izražen u volumnim tj. množinskim udjelima.

$$CH_4 + C_2H_6 + C_3H_8 + C_4H_{10} + CO_2 + CO + N_2 + H_2 + H_2S = 100\%$$

Stehiometrijska količina kisika za izgaranje 1 kg zemnog plina iznosi:

$$V_{O_2 \min} = \left[\frac{1}{2} \cdot (CO + H_2) + \sum \left(x + \frac{y}{4} \right) \cdot C_xH_y - O_2 \right] \cdot \frac{22,4}{100 \cdot M}$$

pri čemu je molarna masa M zemnog plina:

$$M = \sum_i \frac{r_i \cdot M_i}{100}$$

Budući da je volumna (množinska) koncentracija kisika u zraku 21%, minimalni volumen zraka za izgaranje 1 kg goriva računamo po slijedećoj formuli:

$$V_{l \min} = \frac{V_{O_2 \min}}{0,21}$$

Budući da kod izgaranja postoji pretičak zraka stvarni volumen zraka koji se dovodi za izgaranje 1 kg goriva iznosi:

$$V_l = \lambda \cdot V_{l \min}$$

Zbog toga što su entalpije CO_2 i SO_2 jednake, volumeni CO_2 i SO_2 nastali izgaranjem 1 kg goriva se računaju zajedno kao V_{RO_2} .

$$V_{\text{RO}_2} = (\text{CO} + \text{CO}_2 + \sum x \cdot \text{C}_x\text{H}_y) \cdot \frac{22,4}{100 \cdot M}$$

Volumen dušika N_2 nastao izgaranjem 1 kg goriva sa stehiometrijskom smjesom iznosi:

$$V_{\text{N}_2 \text{ min}} = 0,79 \cdot V_{\text{l min}} + \text{N}_2 \cdot \frac{22,4}{100 \cdot M}$$

Volumen vodene pare H_2O nastale izgaranjem 1 kg goriva iznosi:

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = (\text{H}_2 + \sum \frac{y}{2} \cdot \text{C}_x\text{H}_y) \cdot \frac{22,4}{100 \cdot M}$$

Volumen dimnih plinova nastao izgaranjem 1 kg goriva se dobije ako se zbroje prethodno izračunati volumeni V_{RO_2} , $V_{\text{N}_2 \text{ min}}$ i $V_{\text{H}_2\text{O}}$ te volumen zraka uslijed suviška zraka na ulazu u ložište:

$$V_g = V_{\text{RO}_2} + V_{\text{N}_2 \text{ min}} + V_{\text{H}_2\text{O}} + (\lambda - 1) \cdot V_{\text{l min}}$$

Gustoća dimnih plinova se računa po slijedećem izrazu:

$$\rho_g = \frac{44 \cdot V_{\text{RO}_2} + 28 \cdot V_{\text{N}_2 \text{ min}} + 18 \cdot V_{\text{H}_2\text{O}} + 29 \cdot (\lambda - 1) \cdot V_{\text{l min}}}{22,4 \cdot V_g}$$

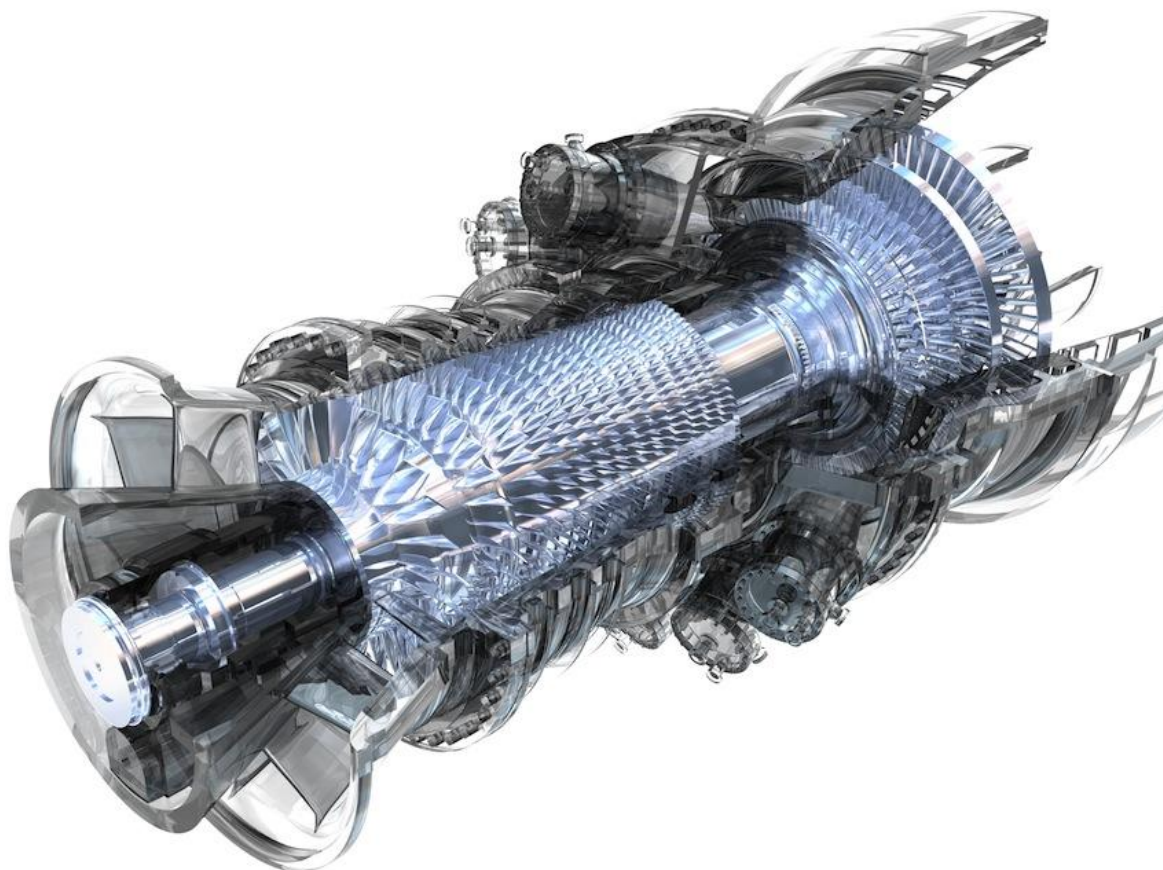
2.2 Matematički model plinsko-turbinskog agregata

U termoenergetskom postrojenju postoji jedan plinsko-turbinski agregat (PTA). Primarno postrojenje sa plinskom turbinom funkcioniše na način da dimni plinovi iz PTA ulaze u kotao na otpadnu toplinu HRSG (od eng. heat recovery steam generator) i pritom se iskorištava njihova toplinska vrijednost, prenoseći toplinu bez dodatnog izgaranja radnom mediju vodi, od pregrijača pare, pa sve do zagrijača mrežne vode.

Plinsko turbinski agregat je jedini element postrojenja u kojem se vrši izgaranje u komori izgaranja i to tako da kompresor usisava okolišni zrak koji se komprimira na viši tlak i odvodi u komoru izgaranja gdje gorivo u kontaktu s kisikom iz zraka vrši proces izgaranja do temperature približno 1200 °C, ovisno o opterećenju plinske turbine.

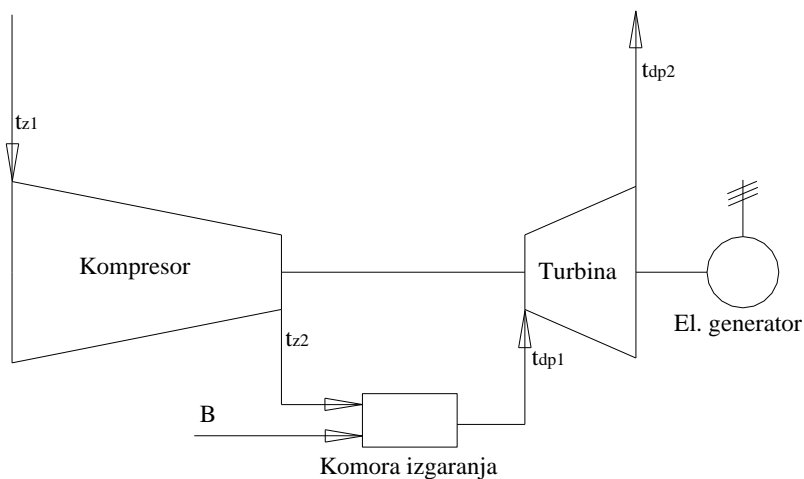
Pri toj temperaturi dimni plinovi kao produkti izgaranja ekspandiraju u turbini i pri temperaturi od približno 600 °C, ovisno o opterećenju plinske turbine napuštaju plinsku turbinu i odlaze u utilizator s ciljem maksimalne iskoristivosti otpadne topline, koja bi se inače odbacila u okoliš, što bi naravno utjecalo na smanjenje termodinamičkog stupnja iskoristivosti postrojenja.

Primjer plinsko-turbinskog agregata PTA na slici (Slika 5), se sastoji od ulaznog aksijalnog kompresora koji usisava okolišni zrak, komore izgaranja u kojoj se plinovito ili kapljevito gorivo miješa sa kisikom iz zraka i pri tome kao produkti izgaranja nastaju dimni plinovi koji ekspandiraju u turbinskom dijelu agregata.



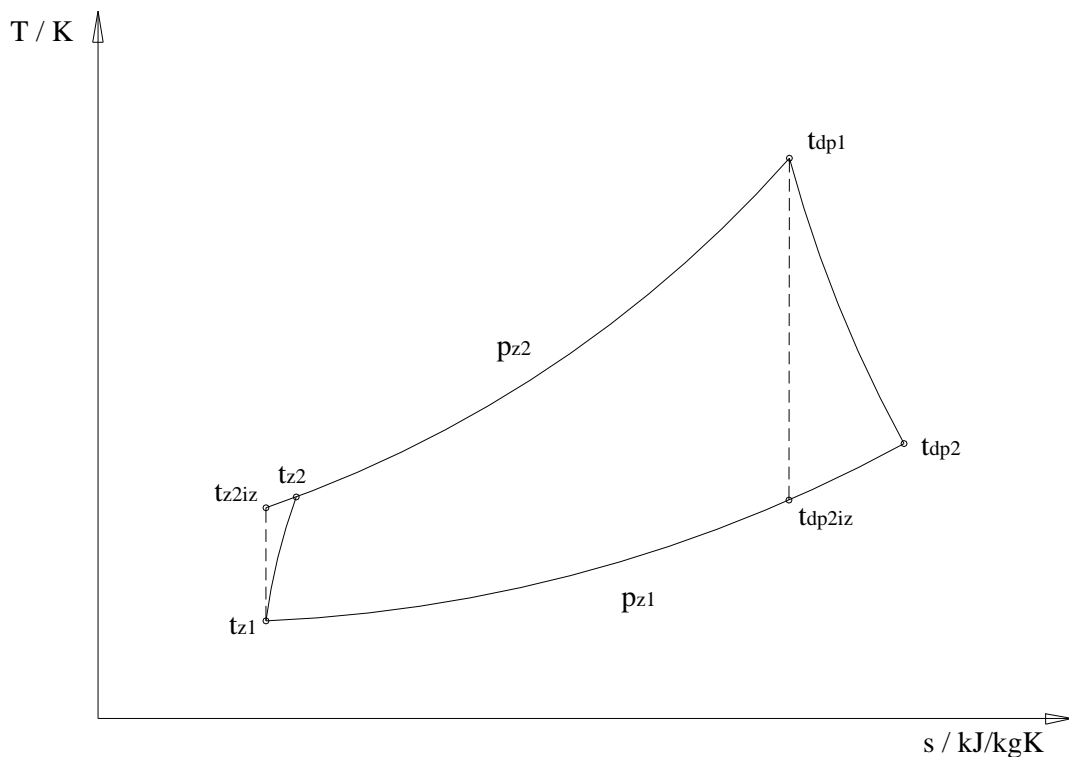
Slika 5: *Primjer plinsko-turbinskog agregata PTA*

Shema plinskog postrojenja prikazana na slici (Slika 6) prikazuje elemente postrojenja i tok struje zraka kroz kompresor i dimnih plinova u komori izgaranja koji naknadno ekspandiraju u turbini.



Slika 6: Shematski prikaz plinsko-turbinskog agregata PTA

Na slici (Slika 7) je shematski prikaz Joule-ovog kružnog procesa u T-s dijagramu koji prikazuje dvije izobare i dvije adijabate. Crtkano je označena izentropa, no s obzirom da je nemoguće postići ravnotežnu adijabatu na dijagramu se vidi prirast entropije za vrijeme kompresije i ekspanzije.



Slika 7: Shematski prikaz promjena stanja zraka i dimnih plinova u plinsko-turbinskom agregatu PTA

Zrak okolišne temperature t_{z1} i tlaka p_{z1} ulazi u kompresor gdje se komprimira na tlak p_{z2} . Kada bi proces bio izentropski temperatura na izlazu iz kompresora bi bila:

$$t_{z2iz} = t_{z1} \cdot \left(\frac{p_{z2}}{p_{z1}} \right)^{\frac{\kappa_z - 1}{\kappa_z}} .$$

Kako proces nije izentropski, iz definicije izentropskog stupnja iskoristivosti kompresora:

$$\eta_k = \frac{t_{z2iz} - t_{z1}}{t_{z2} - t_{z1}}$$

slijedi stvarna temperatura na izlazu iz kompresora:

$$t_{z2} = t_{z1} + \frac{t_{z2iz} - t_{z1}}{\eta_k} .$$

Snaga potrebna za komprimiranje zraka masenog protoka L iznosi:

$$W_k = L \cdot (H_{z2} - H_{z1}) .$$

Komprimirani zrak ulazi u komoru izgaranja gdje s njime izgara gorivo. Specifična entalpija dimnih plinova se računa po slijedećoj jednadžbi:

$$H_{dp1} = \frac{B \cdot H_d + L \cdot (H_{z2} - H_{z0})}{G} + H_{dp0} ,$$

Dobivena je kombinacijom slijedećih jednadžbi:

energetska jednadžba komore izgaranja:

$$H_{dp1} \cdot G = L \cdot H_{z2} + B \cdot H_g .$$

jednadžba održanja mase za komoru izgaranja:

$$G = L + B$$

Definicija ogrjevne vrijednosti:

$$B \cdot H_d = B \cdot H_g + L \cdot H_{z0} - G \cdot H_{dp0}.$$

Iz poznate entalpije dimnih plinova može se odrediti temperatura dimnih plinova t_{dp1} .

Dimni plinovi u plinskoj turbini tlaka p_{z2} i temperature t_{dp1} ekspandiraju do okolišnog tlaka p_{z1} i temperature t_{dp2} koja se računa po slijedećoj relaciji:

$$t_{dp2} = t_{dp1} - \eta_t \cdot (t_{dp1} - t_{dp2iz}),$$

koja je dobivena iz definicije izentropskog stupnja iskoristivosti turbine:

$$\eta_t = \frac{t_{dp1} - t_{dp2}}{t_{dp1} - t_{dp2iz}}.$$

Izentropska temperatura t_{dp2iz} se računa po slijedećoj formuli:

$$t_{dp2iz} = t_{dp1} \cdot \left(\frac{p_{z1}}{p_{z2}} \right)^{\frac{\kappa_{dp}-1}{\kappa_{dp}}}.$$

Snaga dobivena ekspanzijom dimnih plinova u turbini iznosi:

$$W_t = G \cdot (H_{dp1} - H_{dp2})$$

Korisna snaga raspoloživa za pokretanje generatora dobije se ako se od snage dobivene ekspanzijom dimnih plinova u plinskoj turbini oduzme snaga potrebna za pokretanje kompresora:

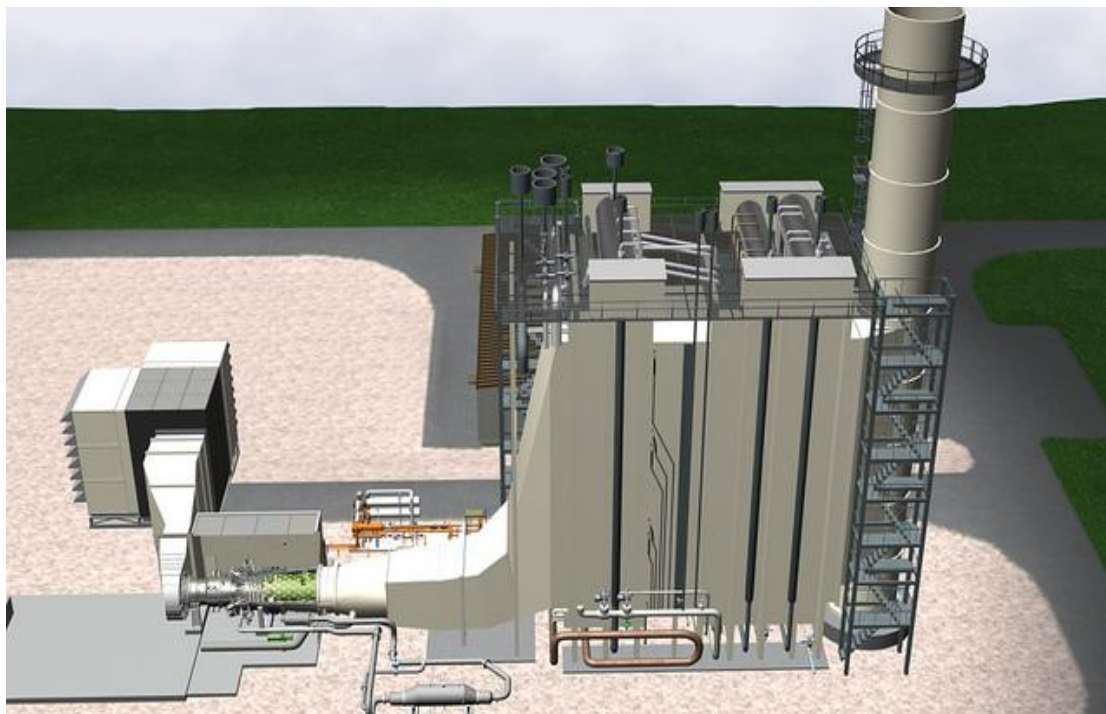
$$W_{kor} = W_t - W_k$$

Iznos električne snage koja se proizvodi u električnom generatoru dobije se ako se korisna snaga W_{kor} pomnoži s stupnjem iskoristivosti električnog generatora, zatim s mehaničkim stupnjem iskoristivosti te s stupnjem iskoristivosti reduktora:

$$W_{el} = \eta_{el} \cdot \eta_{meh} \cdot \eta_{red} \cdot W_{kor}$$

2.3 Matematički model kotla na otpadnu toplinu HRSG

U termoelektrani-toplani Zagreb (TE-TO Zagreb), koja se nalazi u Zagrebu na lokaciji Žitnjak, godine 2009. izgrađen je kombi kogeneracijski blok L s jednom plinskom i jednom parnom turbinom, koristeći za gorivo zemni plin. Termoenergetski blok L u sebi sadrži jedan parni kotao na otpadnu toplinu HRSG. Primjer takvog kotla je prikazan na slici (Slika 8). Navedeni tip utilizatora se sastoji od dva glavna kruga vode gdje se vrši isparavanje na niskom i visokom tlaku i dva zasebna kruga, odnosno zagrijača kondenzata iz kondenzatora i zagrijača mrežne vode koji zagrijava vodu iz mreže.



Slika 8: Primjer kotla na otpadnu toplinu HRSG

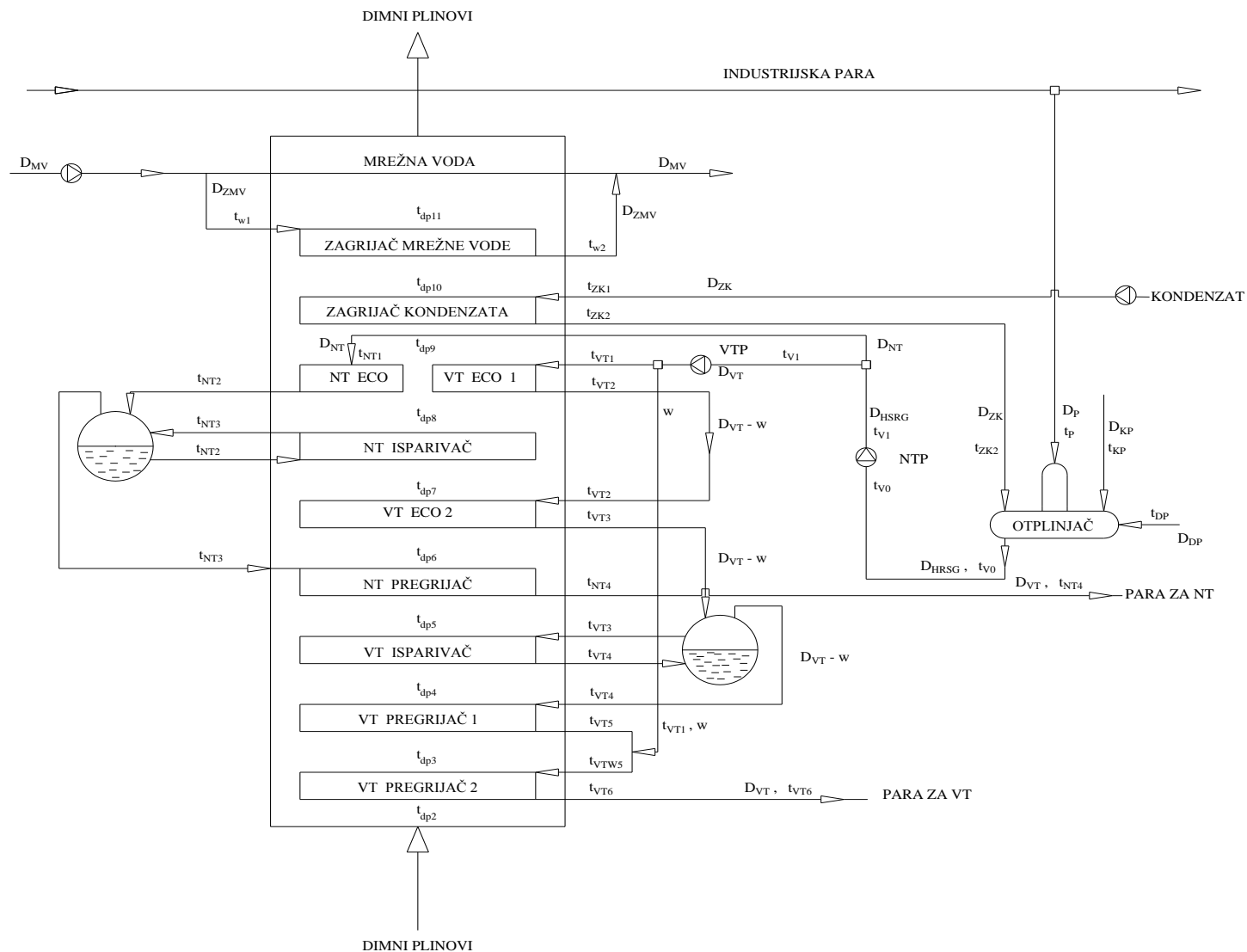
Dimni plinovi koji ovisno o opterećenju plinske turbine (od 60% do 100%) i temperaturi okoliša (od -24°C do 37°C) ulaze u utilizator i to sa temperaturom od oko 600°C , prenose prvo toplinu na cijevni snop pregrijača pare u visokotlačnom dijelu od 100 bara, pa preko isparivača i dva ekonomajzera prenose toplinu u visokotlačnom dijelu, a isto tako zagrijavaju pregrijač, isparivač i ekonomajzer u niskotlačnom dijelu i to na 11 bara. Toplinska stanja vode u niskotlačnom i visokotlačnom krugu prikazana su u tablici 1. Isto tako dimni plinovi predaju toplinu zagrijaču kondenzata i zagrijaču mrežne vode. Nakon prolaska kroz cijeli utilizator dimni plinovi odlaze u okoliš sa temperaturom oko 100°C . Cijeli postupak se vidi na shemi utilizatora HRSG (Slika 9). Još uvijek imamo znatne gubitke osjetne topline, koji su bitno smanjeni u odnosu na kotao u kojem izgara ugljen.

Voda kao radni medij iz kemijske pripreme vode ulazi u otplinjač gdje se zagrijava miješajući se s parom, koja se oduzima iz parne turbine kondenzirajući se i pri tome predaje toplinu napojnoj vodi, koja se nakon izlaska iz otplinjača niskotlačnom pumpom diže na nešto veći tlak od tlaka zasićenja od 11 bara u niskotlačnom krugu vode. Tako pripremljena napojna voda se račva u dva dijela i to dio vode odlazi u visokotlačnu pumpu na nešto veći tlak od tlaka zasićenja od 100 bara u visokotlačnom krugu vode, a dio u već spomenuti niskotlačni krug. Dio masenog protoka vode visokotlačnog kruga se neposredno prije ulaska u HRSG, odvaja za ubrizgavanje vode između pregrijača pare 1 i pregrijača pare 2 za regulaciju temperature pregrijane pare na ulazu u VT pregrijač, a samim time i izlasku iz utilizatora, gdje se dalje proizvedena pregrijana para odvodi u

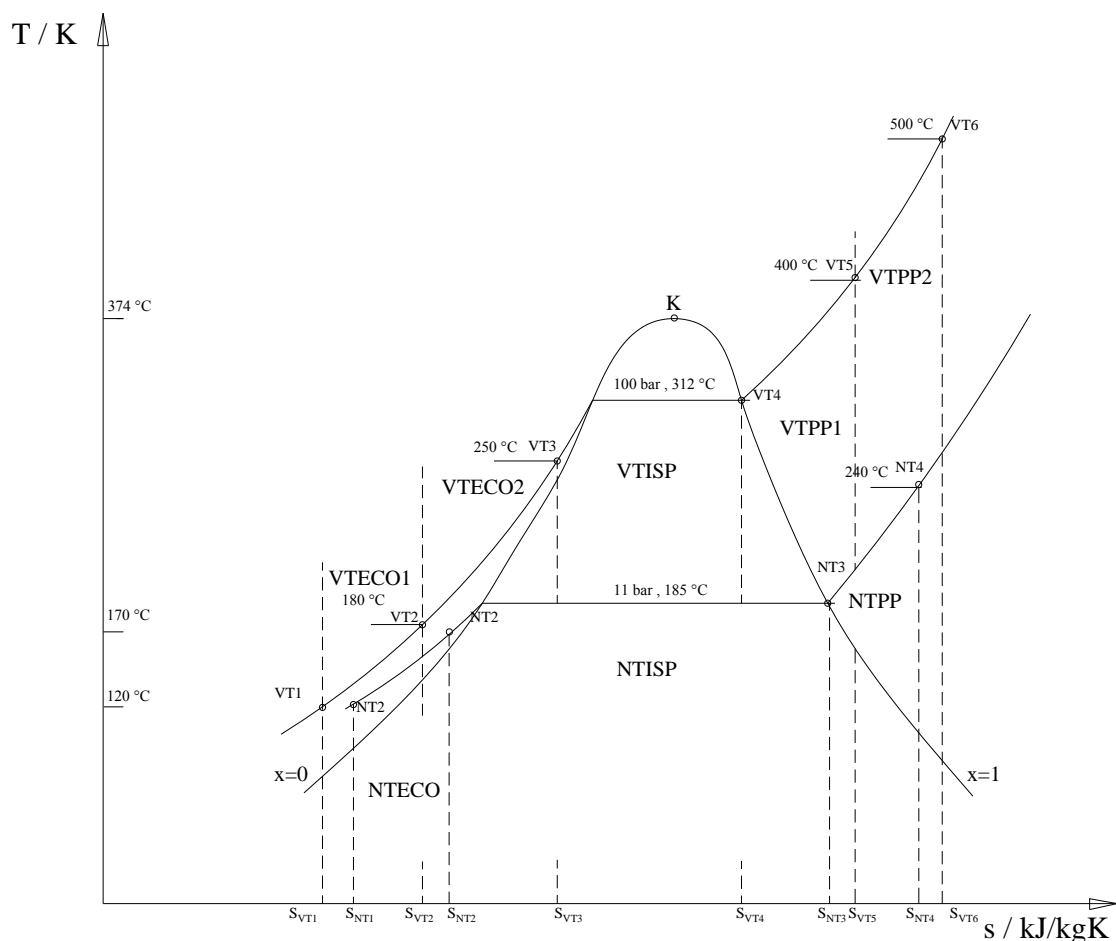
visokotlačni stupanj parne turbine. Treba napomenuti da se proizvedena pregrijana para iz niskotlačnog kruga pare, odvodi u niskotlačni stupanj parne turbine.

Toplinski konzum koji treba zadovoljiti dijeli se na proizvedenu industrijsku paru koja se oduzima iz parne turbine i za zagrijavanje mrežne vode koja se zagrijava tako da se jedan dio mrežne vode direktno zagrijava dimnim plinovima u utilizatoru, a dio vode se zagrijava u zagrijačima mrežne vode C5 i C6, topline od pare koja se oduzima iz parne turbine. Cijeli postupak je prikazan u shemi kogeneracijskog postrojenja s kombiniranim ciklusom na slici (Slika 4).

Dio proizvedene pare se nakon ekspanzije u parnoj turbini odvodi u kondenzator gdje se kondenzira na tlaku koji je bitno ispod tlaka okoliša od približno 0,05 bara na temperaturu pothlađene kapljevine od oko 30 °C. Vrijednost entalpije vode se povećava na način da se kondenzat prvo podigne pumpom na nešto veći tlak od tlaka zasićenja koji vlada u otplinjaču (2,5 bar) i neposredno zagrijava dimnim plinovima u zagrijaču kondenzata, a zatim se tako zagrijani kondenzat miješa s parom i otplinjava u otplinjača. Sva voda koja ulazi u HRSG, bez obzira dali je u kapljevitoj ili parnoj fazi mora proći kroz otplinjač. Postupak opisan u ovom tekstu shematski je prikazan na slici (Slika 9).



Slika 9: Toplinska shema kotla na otpadnu toplotu *HRSG*



Slika 10: Shematski prikaz promjena stanja vode u kotlu na otpadnu toplinu HRSG

U T-s dijagramu (Slika 10) prikazani su niskotlačni krug i visokotlačni krug pare kroz utilizator u kojem se vrši isparivanje vode. Vodena para se zagrijava dimnim plinovima koji ulaze u parni kotao s temperaturom od približno 600°C i predajući toplinu vodi napuštaju parni kotao s temperaturom od 100°C, predajući nepovratno toplinu okolišu. U tablici (Tablica 1) imamo podatke za vodu u zadanim elementima parnog kotla na otpadnu toplinu.

Tablica 1: Toplinska stanja vode u NT i VT dijelu utilizatora

	t_{ui} [°C]	p_{ui} [bar]	t_{iz} [°C]	p_{iz} [bar]
NT ECO	120	19	170	13
NT ISPARIVAČ	170	13	185	11
NT PREGRIJAČ	185	11	240	10
VT ECO 1	120	103	180	102
VT ECO 2	180	102	250	101
VT ISPARIVAČ	250	101	312	100
VT PREGRIJAČ 1	312	100	400	98
VT PREGRIJAČ 2	400	98	500	95

2.3.1 JEDNADŽBE MATEMATIČKOG MODELA KOTLA NA OTPADNU TOPLINU HRSG:

2.3.1.1 Zagrijač mrežne vode:

$$Q_{ZMV} = G \cdot (H_{dp10} - H_{dp11}) \cdot \eta_{zr}$$

$$Q_{ZMV} = D_{ZMV} \cdot (H_{W2} - H_{W1})$$

$$Q_{ZMV} = k_{ZMV} \cdot A_{ZMV} \cdot \Delta T_{mZMV}$$

Gdje su:	Q_{ZMV}	[MW]	toplinska snaga zagrijača mrežne vode
	G	[kg/s]	maseni protok dimnih plinova
	H_{dp}	[J/kg]	specifična entalpija dimnih plinova
	H_w	[J/kg]	specifična entalpija mrežne vode
	η_{zr}		stupanj iskoristivosti topline zračenjem
	D_{ZMV}	[kg/s]	maseni protok mrežne vode kroz HRSG
	k_{ZMV}	[W/(m ² K)]	koeficijent prolaza topline zagrijača mrežne vode
	A_{ZMV}	[m ²]	površina stijenke za izmjenjivanje topline u ZMV
	ΔT_{mZMV}	[K]	srednja razlika temperature vode i dim. plinova u ZMV

2.3.1.2 Zagrijač kondenzata:

$$Q_{ZK} = G \cdot (H_{dp9} - H_{dp10}) \cdot \eta_{zr}$$

$$Q_{ZK} = D_{ZK} \cdot (H_{ZK2} - H_{ZK1})$$

$$Q_{ZK} = k_{ZK} \cdot A_{ZK} \cdot \Delta T_{mZK}$$

Gdje su:	Q_{ZK}	[MW]	toplinska snaga zagrijača kondenzata
	G	[kg/s]	maseni protok dimnih plinova
	H_{dp}	[J/kg]	specifična entalpija dimnih plinova
	H_{ZK}	[J/kg]	specifična entalpija kondenzata
	η_{zr}		stupanj iskoristivosti topline zračenjem
	D_{ZK}	[kg/s]	maseni protok kondenzata kroz HRSG
	k_{ZK}	[W/(m ² K)]	koeficijent prolaza topline zagrijača kondenzata
	A_{ZK}	[m ²]	površina stijenke za izmjenjivanje topline u ZK
	ΔT_{mZK}	[K]	srednja razlika temperature vode i dimnih plinova u ZK

2.3.1.3 Otplinjač:

$$D_{HRSG} = D_{ZK} + D_P + D_{KP} + D_{otp}$$

$$D_{HRSG} = D_{NT} + D_{VT}$$

$$D_{HRSG} \cdot H_{V0} = D_{ZK} \cdot H_{ZK2} + D_P \cdot H_P + D_{KP} \cdot H_{KP} + D_{otp} \cdot H_{otp}$$

Gdje su:	D_{HRSG}	[kg/s]	maseni protok napojne vode za proizvodnju pare u HRSG
	D_{ZK}	[kg/s]	maseni protok vode kroz zagrijač kondenzata
	D_P	[kg/s]	maseni protok pare iz turbine koja ulazi u otplinjač
	D_{KP}	[kg/s]	maseni protok kondenzata iz zagrijača vode C6
	D_{otp}	[kg/s]	maseni protok vode iz malog otplinjača
	D_{NT}	[kg/s]	maseni protok kroz niskotlačni krug pare
	D_{VT}	[kg/s]	maseni protok kroz visokotlačni krug pare
	H_{V0}	[J/kg]	specifična entalpija vode nakon otplinjača
	H_{ZK2}	[J/kg]	specifična entalpija kondenzata
	H_P	[J/kg]	specifična entalpija pare iz turbine koja ulazi u otplinjač
	H_{KP}	[J/kg]	specifična entalpija kondenzata iz ZMV C6
	H_{otp}	[J/kg]	specifična entalpija vode iz malog otplinjača

2.3.1.4 Niskotlačni krug pare:

2.3.1.4.1 NT Pumpa:

$$H_{v1} = H_{v0} + \frac{H_{v1iz} - H_{v0}}{\eta_p}$$

$$W_{NT} = D_{NT} \cdot (H_{v1} - H_{v0})$$

Gdje su:	H_{v1}	[J/kg]	stvarna specifična entalpija vode nakon pumpe
	H_{v1iz}	[J/kg]	teoretska specifična entalpija vode nakon pumpe
	H_{v0}	[J/kg]	specifična entalpija vode na ulazu u pumpu
	η_p		stupanj iskoristivosti pumpe
	W_{NT}	[W]	snaga pumpe vode u niskotlačnom krugu pare
	D_{NT}	[kg/s]	maseni protok vode kroz niskotlačni krug pare

2.3.1.4.2 NT Ekonomajzer:

$$G = G_1 + G_2$$

$$Q_{ECO} = G_1 \cdot (H_{dp8} - H_{dp9}) \cdot \eta_{zr}$$

$$Q_{ECO} = D_{NT} \cdot (H_{NT2} - H_{NT1})$$

$$Q_{ECO} = k_{ECO} \cdot A_{ECO} \cdot \Delta T_{mECO}$$

Gdje su:	Q_{ECO}	[MW]	toplinska snaga ekonomajzera
	G	[kg/s]	maseni protok dimnih plinova
	G_1	[kg/s]	maseni protok dimnih plinova koji zagrijava ECO
	H_{dp}	[J/kg]	specifična entalpija dimnih plinova
	H_{NT}	[J/kg]	specifična entalpija vode u niskotlačnom krugu
	η_{zr}		stupanj iskoristivosti topline zračenjem
	D_{NT}	[kg/s]	maseni protok vode kroz niskotlačni krug pare
	k_{ECO}	[W/(m ² K)]	koeficijent prolaza topline ekonomajzera
	A_{ECO}	[m ²]	površina stijenke za izmjenjivanje topline u ECO
	ΔT_{mECO}	[K]	srednja razlika temperature vode i dim. plinova u ECO

2.3.1.4.3 NT Isparivač:

$$Q_{ISP} = G \cdot (H_{dp7} - H_{dp8}) \cdot \eta_{\tau}$$

$$Q_{ISP} = D_{PNT} \cdot (H_{NT3} - H_{NT2})$$

$$Q_{ISP} = k_{ISP} \cdot A_{ISP} \cdot \Delta T_{mISP}$$

Gdje su:	Q_{ISP}	[MW]	toplinska snaga isparivača
	G	[kg/s]	maseni protok dimnih plinova
	H_{dp}	[J/kg]	specifična entalpija dimnih plinova
	H_{NT}	[J/kg]	specifična entalpija pare u niskotlačnom krugu pare
	η_{τ}		stupanj iskoristivosti topline zračenjem
	D_{PNT}	[kg/s]	maseni protok kroz zasebni niskotlačni krug pare isparivača i separatora
	k_{ISP}	[W/(m ² K)]	koeficijent prolaza topline isparivača
	A_{ISP}	[m ²]	površina stijenke za izmjenjivanje topline u ISP
	ΔT_{mISP}	[K]	srednja razlika temperature pare i dimnih plinova u ISP

2.3.1.4.4 NT Pregrijač:

$$Q_{PR} = G \cdot (H_{NT5} - H_{NT6}) \cdot \eta_{\tau}$$

$$Q_{PR} = D_{NT} \cdot (H_{NT4} - H_{NT3})$$

$$Q_{PR} = k_{PR} \cdot A_{PR} \cdot \Delta T_{mPR}$$

Gdje su:	Q_{PR}	[MW]	toplinska snaga pregrijača
	G	[kg/s]	maseni protok dimnih plinova
	H_{dp}	[J/kg]	specifična entalpija dimnih plinova
	H_{NT}	[J/kg]	specifična entalpija pare u niskotlačnom krugu
	η_{τ}		stupanj iskoristivosti topline zračenjem
	D_{NT}	[kg/s]	maseni protok kroz niskotlačni krug pare
	k_{PR}	[W/(m ² K)]	koeficijent prolaza topline pregrijača
	A_{PR}	[m ²]	površina stijenke za izmjenjivanje topline u PR
	ΔT_{mPR}	[K]	srednja razlika temperature pare i dimnih plinova u PR

2.3.1.5 Visokotlačni krug pare:

2.3.1.5.1 VT Pumpa:

$$H_{VT1} = H_{V1} + \frac{H_{VT1iz} - H_{V1}}{\eta_P}$$

$$W_{VT} = D_{VT} \cdot (H_{VT1} - H_{V1})$$

Gdje su:	H_{VT1}	[J/kg]	stvarna specifična entalpija vode nakon pumpe
	H_{VT1iz}	[J/kg]	teoretska specifična entalpija vode nakon pumpe
	H_{V1}	[J/kg]	specifična entalpija vode na ulazu u pumpu
	η_P		stupanj iskoristivosti pumpe
	W_{VT}	[W]	snaga pumpe vode u visokotlačnom krugu pare
	D_{VT}	[kg/s]	maseni protok vode kroz pumpu

2.3.1.5.2 Ubrizgavanje vode za hlađenje:

$$(D_{VT} - w) \cdot H_{VT5} + w \cdot H_{VT1} = D_{VT} \cdot H_{VTw5}$$

Gdje su:	D_{VT}	[kg/s]	maseni protok kroz visokotlačni krug pare
	w	[kg/s]	maseni protok ubrizgavajuće vode za hlađenje pare
	H_{VT5}	[J/kg]	specifična entalpija pare na izlazu iz VT pregrijača 1
	H_{VT1}	[J/kg]	specifična entalpija ubrizgavajuće vode za hlađenje pare
	H_{VTw5}	[J/kg]	specifična entalpija pare na ulazu u VT pregrijač 2

2.3.1.5.3 VT Ekonomajzer 1:

$$G = G_1 + G_2$$

$$Q_{ECO1} = G_2 \cdot (H_{dp8} - H_{dp9}) \cdot \eta_{zr}$$

$$Q_{ECO1} = (D_{VT} - w) \cdot (H_{VT2} - H_{VT1})$$

$$Q_{ECO1} = k_{ECO1} \cdot A_{ECO1} \cdot \Delta T_{mECO1}$$

Gdje su:	Q_{ECO1}	[MW]	toplinska snaga ekonomajzera
	G	[kg/s]	maseni protok dimnih plinova
	G_2	[kg/s]	maseni protok dimnih plinova koji zagrijava ECO1
	H_{dp}	[J/kg]	specifična entalpija dimnih plinova
	H_{VT}	[J/kg]	specifična entalpija vode u visokotlačnom krugu
	η_{zr}		stupanj iskoristivosti topline zračenjem
	D_{VT}	[kg/s]	maseni protok kroz visokotlačni krug pare
	w	[kg/s]	maseni protok ubrizgavajuće vode za hlađenje pare
	k_{ECO1}	[W/(m ² K)]	koeficijent prolaza topline ekonomajzera
	A_{ECO1}	[m ²]	površina stijenke za izmjenjivanje topline u ECO1
	ΔT_{mECO1}	[K]	srednja razlika temperature vode i dim. plinova u ECO1

2.3.1.5.4 VT Ekonomajzer 2:

$$Q_{ECO2} = G \cdot (H_{dp6} - H_{dp7}) \cdot \eta_{zr}$$

$$Q_{ECO2} = (D_{VT} - w) \cdot (H_{VT3} - H_{VT2})$$

$$Q_{ECO2} = k_{ECO2} \cdot A_{ECO2} \cdot \Delta T_{mECO2}$$

Gdje su:	Q_{ECO2}	[MW]	toplinska snaga ekonomajzera
	G	[kg/s]	maseni protok dimnih plinova
	H_{dp}	[J/kg]	specifična entalpija dimnih plinova
	H_{VT}	[J/kg]	specifična entalpija vode u visokotlačnom krugu
	η_{zr}		stupanj iskoristivosti topline zračenjem
	D_{VT}	[kg/s]	maseni protok kroz visokotlačni krug pare
	w	[kg/s]	maseni protok ubrizgavajuće vode za hlađenje pare
	k_{ECO2}	[W/(m ² K)]	koeficijent prolaza topline ekonomajzera
	A_{ECO2}	[m ²]	površina stijenke za izmjenjivanje topline u ECO2
	ΔT_{mECO2}	[K]	srednja razlika temperature vode i dim. plinova u ECO2

2.3.1.5.5 VT Isparivač:

$$Q_{ISP} = G \cdot (H_{dp4} - H_{dp5}) \cdot \eta_{zr}$$

$$Q_{ISP} = D_{PVT} \cdot (H_{VT4} - H_{VT3})$$

$$Q_{ISP} = k_{ISP} \cdot A_{ISP} \cdot \Delta T_{mISP}$$

Gdje su:	Q_{ISP}	[MW]	toplinska snaga isparivača
	G	[kg/s]	maseni protok dimnih plinova
	H_{dp}	[J/kg]	specifična entalpija dimnih plinova
	H_{VT}	[J/kg]	specifična entalpija pare u visokotlačnom krugu pare
	η_{zr}		stupanj iskoristivosti topline zračenjem
	D_{PVT}	[kg/s]	maseni protok kroz zasebni visokotlačni krug pare isparivača i separatora
	k_{ISP}	[W/(m ² K)]	koeficijent prolaza topline isparivača
	A_{ISP}	[m ²]	površina stijenke za izmjenjivanje topline u ISP
	ΔT_{mISP}	[K]	srednja razlika temperature pare i dimnih plinova u ISP

2.3.1.5.6 VT Pregrijač 1:

$$Q_{PR1} = G \cdot (H_{dp3} - H_{dp4}) \cdot \eta_{zr}$$

$$Q_{PR1} = (D_{VT} - w) \cdot (H_{VT5} - H_{VT4})$$

$$Q_{PR1} = k_{PR1} \cdot A_{PR1} \cdot \Delta T_{mPR1}$$

Gdje su:	Q_{PR1}	[MW]	toplinska snaga pregrijača
	G	[kg/s]	maseni protok dimnih plinova
	H_{dp}	[J/kg]	specifična entalpija dimnih plinova
	H_{VT}	[J/kg]	specifična entalpija vode u visokotlačnom krugu
	η_{zr}		stupanj iskoristivosti topline zračenjem
	D_{VT}	[kg/s]	maseni protok kroz visokotlačni krug pare
	w	[kg/s]	maseni protok ubrizgavajuće vode za hlađenje pare
	k_{PR1}	[W/(m ² K)]	koeficijent prolaza topline pregrijača
	A_{PR1}	[m ²]	površina stijenke za izmjenjivanje topline u PR1
	ΔT_{mPR1}	[K]	srednja razlika temperature pare i dimnih plinova u PR1

2.3.1.5.7 VT Pregrijač 2:

$$Q_{PR2} = G \cdot (H_{dp2} - H_{dp3}) \cdot \eta_{\tau}$$

$$Q_{PR2} = D_{VT} \cdot (H_{VT6} - H_{VTw5})$$

$$Q_{PR2} = k_{PR2} \cdot A_{PR2} \cdot \Delta T_{mPR2}$$

Gdje su:	Q_{PR2}	[MW]	toplinska snaga pregrijača
	G	[kg/s]	maseni protok dimnih plinova
	H_{dp}	[J/kg]	specifična entalpija dimnih plinova
	H_{VT}	[J/kg]	specifična entalpija pare u visokotlačnom krugu
	η_{τ}		stupanj iskoristivosti topline zračenjem
	D_{VT}	[kg/s]	maseni protok kroz visokotlačni krug pare
	k_{PR2}	[W/(m ² K)]	koeficijent prolaza topline pregrijača
	A_{PR2}	[m ²]	površina stijenke za izmjenjivanje topline u PR2
	ΔT_{mPR2}	[K]	srednja razlika temperature pare i dimnih plinova u PR2

2.4 Matematički model parne turbine

Parna turbina se sastoji od visokotlačnog i niskotlačnog dijela kako je pokazano na primjeru parne turbine na slici (Slika 11). Turbina ima dva oduzimanja. Prvo oduzimanje je na kraju visokotlačnog dijela na tlaku od 11 bar, dok je drugo oduzimanje u niskotlačnom dijelu na tlaku od 2,5 bar.

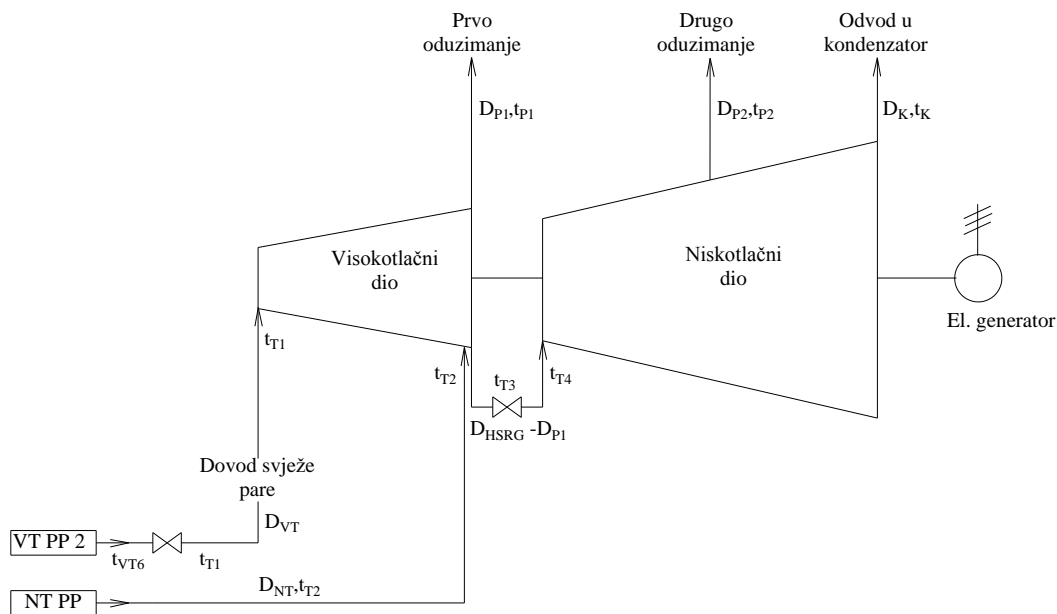
Proizvedena pregrijana para na tlaku od 95 bar u visokotlačnom krugu vode napušta pregrijač pare 2 i odvodi se u visokotlačni stupanj parne turbine gdje ekspandira i na kojem se dovodi proizvedena pregrijana para iz niskotlačnog kruga vode.

Na nešto nižem tlaku se ukupna količina pare dijeli na dva dijela. Na kraju visokotlačnog stupnja imamo prvo oduzimanje pare na tlaku od 11 bara, koja se dalje odvodi za potrebe toplinskog konzuma u obliku industrijske pare. Drugi dio ukupne količine pare se odvodi u niskotlačni stupanj parne turbine gdje ekspandira do tlaka od 2,5 bar u otplinjaču, gdje imamo drugo oduzimanje pare, koje se dalje odvodi u zagrijač mrežne vode C5 i nakon predaje topline mrežnoj vodi, miješa s pothlađenim kondenzatom iz kondenzatora.



Slika 11: *Primjer parne turbine*

Protok pregrijane pare, prikazan shematski na slici (Slika 12) u visokotlačnom krugu se regulira ventilom, tako da para ulazi u visokotlačni stupanj parne turbine sa oko 85 bar, ovisno o opterećenju plinske turbine. Nakon prolaska kroz ventil, dolazi do naglog nepovratnog pada tlaka, tako da se u najužem presjeku ventila prvo smanjuje i tlak i entalpija, a brzina i kinetička energija čestica se povećava radi suženja, no nakon najužeg presjeka, čestice zbog tromosti ne mogu naglo obići oštre rubove, pa dolazi do odvajanja struje od stjenke (kontrakcija mlaza), javljaju se vrtlozi i viskozne sile koje troše kinetičku energiju i dolazi do pretvaranja kinetičke u unutarnju energiju, a samim time i do povećanja entalpije do prvobitne vrijednosti.



Slika 12: Shematski prikaz parne turbine

Strujanje pare kroz ventil je adijabatski proces, a nepovratni pad tlaka koji se javlja tijekom strujanja ne možemo koristiti za tehnički rad zbog trenja i po prvom glavnom stavku entalpija mora imati jednaku vrijednost. Entalpija nije konstantna tijekom procesa, već je jednaka na početku i na kraju procesa, dovoljno daleko od prigušilišta, u ravnotežnim toplinskim stanjima.

Isto tako reguliramo protok pare i u niskotlačni stupanj parne turbine preko ventila. Para ulazi u niskotlačni stupanj sa oko 7 bar, ovisno o opterećenju plinske turbine.

Ostatak pare, nakon drugog oduzimanja, ekspandira u niskotlačnom stupnju parne turbine do kondenzatorskog tlaka, odnosno podtlaka koji vlada u kondenzatoru. Para ulazi u kondenzator s vlagom od 8%-12%.

Kondenzatorski tlak u kondenzatoru je određen temperaturom rashladnog spremnika (rashladna voda), što direktno utječe na temperaturu kondenzacije, a samim time i na tlak kondenzacije u kondenzatoru.

Da bi u kondenzatoru održali potreban podtlak odnosno vakuum, potrebno je isisavati nekondenzirajuće plinove kao zrak, O_2 , CO_2 , koji ulaze zbog propuštanja prirubničkih spojeva, kao i zbog dotoka dodatne vode u kojoj su ti plinovi otopljeni. Podtlak održavamo parnim ejektorima ili rotacijskim vakuum pumpama.

2.4.1 JEDNADŽBE MATEMATIČKOG MODELA PARNE TURBINE:

2.4.1.1 Visokotlačni stupanj parne turbine:

Izentropska snaga visokotlačnog stupnja parne turbine:

$$W_{P_{IVTS}} = D_{VT} \cdot (H_{VT1} - H_{TP1}) + (D_{VT} - D_{P1}) \cdot (H_{TP1} - H_{T3})$$

2.4.1.2 Niskotlačni stupanj parne turbine:

Izentropska snaga niskotlačnog stupnja parne turbine:

$$W_{P_{INTS}} = (D_{HRSG} - D_{P1}) \cdot (H_{T4} - H_{TP2}) + (D_{HRSG} - D_{P1} - D_{P2}) \cdot (H_{TP2} - H_K)$$

2.4.1.3 Bilanca mase:

Bilanca masenog protoka D_K na izlazu iz niskotlačnog stupnja parne turbine u kondenzator:

$$D_{HRSG} = D_{NT} + D_{VT}$$

$$D_K = D_{HRSG} - D_{P1} - D_{P2}$$

Ukupna snaga parne turbine dobivena izentropskom ekspanzijom vodene pare:

$$W_{P_{TS}} = W_{P_{IVTS}} + W_{P_{INTS}}$$

Stupanj ukupne izentropske iskoristivosti parne turbine:

$$\eta = \frac{W_{Pt}}{W_{P_{TS}}}$$

Ukupna snaga parne turbine dobivena stvarnom ekspanzijom vodene pare:

$$W_{Pt} = \eta \cdot W_{P_{TS}}$$

Električna snaga koja se proizvodi u električnom generatoru:

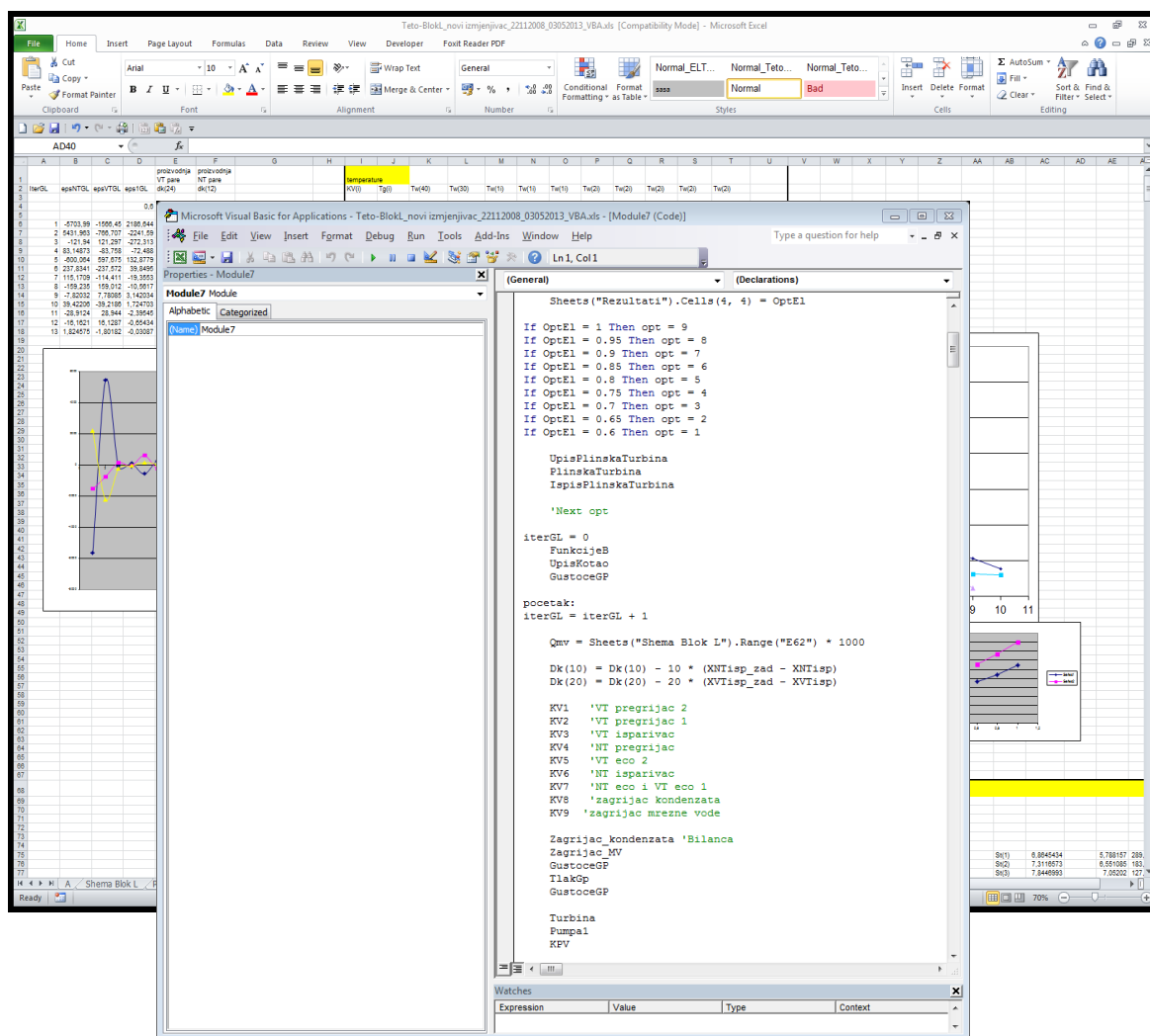
$$W_{el} = \eta_{el} \cdot \eta_{meh} \cdot \eta_{red} \cdot W_{Pt}$$

2.5 Međuvisnost među modelima

Dovršavanjem svih potrebnih matematičkih proračuna i fizikalnih rješenja stvaraju se uvjeti za njihovo međusobno povezivanje. Takvo povezivanje matematički je jednoznačno ali bi uz primjenu svih specifičnih podataka vezanih uz konkretni slučaj dovelo do primjenjivosti takovog proračuna isključivo uz promatrane podatke, kao što je potrebna električna snaga i potreban toplinski konzum, te bi isto bilo ne upotrebljivo za slične slučajeve gdje su potrebe drugačije vremenski raspoređene. Cijeli bi se postupak morao ponavljati u dijelu proračuna čak za isto postrojenje ali uz primjenu novih podataka za proteklo vremensko razdoblje ili kao dio planiranja za buduće vremensko razdoblje.

Svojedobno se ovaj mukotrpan i vremenski zahtjevan posao nije mogao izbjeći. U današnje vrijeme nad ovakvim problemom primjenjuju se nove tehnologije uz naglasak na IT rješenja i razvoj programskog rješenja, gdje se unaprijed predviđa unos različitih parametara dok se sama struktura matematičkog modela zapisuje u sam fundament programskog rješenja.

U ovom diplomskom radu korišteno je jedno takovo programsko rješenje radi višestrukog ubrzanja proračuna, bez obzira na snagu i upotrebljivost ovakvih rješenja sasvim je izvjesno da ona ne bi bila moguća bez prethodnih tehničkih proračuna izvedenih u ovom poglavlju diplomskog rada.



Slika 13: Prikaz programskog rješenja razvijenog za MS Excel u VBA programskom jeziku

3 OPIS PROGRAMA

Programsko rješenja koje je korišteno u izradi ovog diplomskog rada napisano je u programskom jeziku **Visual Basic (VBA)** za program Microsoft® Excel™. Obzirom na široku upotrebu ovog alata neophodno je opisati njegove sastavne elemente koji su poslužili pri rješavanju diplomskog zadatka.

3.1 Programsko rješenje

Excel-ova datoteka 'Teto-Blok L.xls' sadrži više sheet-ova. U slijedećim poglavljima će biti opisano što se nalazi u kojem sheet-u.

3.1.1 TETO-BLOK L SHEMA

Sheet 'Shema Blok L.xls' prikazuje toplinsku shemu prikazanu na slici (Slika 4) novo izrađenog bloka L Termoelektrane – toplane Zagreb na Žitnjaku.

Osim što pokazuje raspored elemenata postrojenja i spojeve među njima, shema je zamišljena tako da se mogu direktno mijenjati razni parametri (crvenom označeno), bez ulaska u program. Pritiskom na 'Start' se pokreće iteriranje za parametre koji su predviđeni da se mijenjaju. Nakon n iteracija ovisno o slučaju u narednim sheet-ovima se mogu vidjeti rezultati.

3.1.2 PTA

Sheet 'PTA' prikazuje test plinske turbine.

Na osnovu raznih opterećenja od 60% do 100% i različitih temperatura okoliša, PTA postiže različite rezultate i to je upravo prikazano u odgovarajućim tabelama i dijagramima.

3.1.3 GORIVO

Sheet 'Gorivo' prikazuje kemijski sastav zemnog plina, uključujući molarnu masu, gustoću i donju ogrjevnju vrijednost H_d .

3.1.4 RAZNO

Sheet 'Razno' prikazuje kemijski sastav dimnih plinova i vrijednosti entalpija.

3.1.5 REZULTATI

Sheet 'Rezultati' prikazuje izračunate temperature za dimne plinove i vodu i dijagrame koji prikazuju određena toplinska stanja za jedan i drugi medij.

3.1.6 REZULTATI 1 I 2

Sheet-ovi 'Rezultati 1 i 2' prikazuju ovisnost o opterećenju plinske turbine u odnosu na temperaturu okoliša i određenu električnu snagu plinske i parne turbine na osnovu minimalnog i maksimalnog toplinskog konzuma. Rezultati su prikazani u tabelama i dijagramima.

3.1.7 REZULTATI 3

Sheet 'Rezultati 3' prikazuje korisnost postrojenja s minimalnom i maksimalnom proizvodnjom topline i ukupnu električnu snagu s minimalnom i maksimalnom toplinskom snagom.

3.1.8 TABLICE

Sheet 'Tablice' prikazuju podatke za razna toplinska stanja vode i dimnih plinova.

4 MATEMATIČKI MODELI SIMULACIJE SATNOG RADA TERMoeLEKTRANE

Na osnovu matematičkog modela potrebno je simulirati satni rad elektrane s jednim velikim i sa dva manja bloka kroz godinu dana na temelju realne krivulje toplinskog konzuma te odrediti postoje li i kolike su eventualne uštede u gorivu.

4.1 *Toplinski konzum*

Kogeneracijska postrojenja s kombiniranim ciklusom uvjetovana su toplinskim konzumom koji uvjetuje proizvodnju električne energije.

Drugim riječima toplinske potrebe se moraju zadovoljiti svih dvadeset i četiri sata dnevno, a na osnovu dnevnog i noćnog rada, plinski agregat prilagođavamo određenim opterećenjima, posebno za dnevni, a posebno za noćni rad.

Datoteka '2009.konzum.xls' prikazuje realni toplinski konzum za 2009. godinu i podijeljen je na dvadeset i četiri sata dnevno, godinu dana (24 /365), dakle ukupno 8760 sati.

Za svaki sat topline koju je potrebno proizvesti imamo različite temperature okoliša koje su ujedno uključujući i tlak okoliša, početno toplinsko stanje na ulazu u turbokompresor plinskog agregata.

Plinsko postrojenje ovisi o temperaturi okoliša koje se znatno mijenja tokom godine, a samim time kad su temperature niže, potrebno je više topline, tako da su potrebe za toplinskim konzumom veće i obratno.

Treba napomenuti da je namjena toplinske energije višestruka; potreba za toplom vodom, grijanje, proizvodnju industrijske pare za razna procesna postrojenja ili za neke vrste industrija gdje se para kao medij direktno koristi, recimo za uparivačke stanice u prehrambenoj industriji za proizvodnju sokova, umaka ili što već.

U zadanom stupcu toplinskog konzuma u MW i stupac pokraj u GJ, sheet 'A' prikazuje za različite temperature okoliša različite vrijednosti toplinske snage odnosno toplinskog konzuma.

Zadaća je kogeneracijskog termoeenergetskog postrojenja da zadovolji u svakom trenutku potrebe za toplinom, u uvjetima u kojem se toplinski tokovi mijenjaju s vremenom i to satnom podjelom, dolazimo do zaključka da je potrebno fleksibilno djelovanje u kojem isto tako treba težiti što većoj efikasnosti rada postrojenja.

Analizom realnog toplinskog konzuma za 2009. godinu, koja je podijeljena u satima, sveukupno je došlo do raznoraznih ispada u vremenu od 226 sati, što je red veličina desetak dana.

Za vrijeme tih ispada računamo da nema rada elektrane, tako da je fokus na 355 dana, odnosno točnije 8534 sata.

4.2 *Model s velikom plinskom turbinom*

U matematičkom modelu s jednom velikom plinskom turbinom treba na što efikasniji način prikazati rad plinske turbine koja upravlja cijelim postrojenjem.

Plinsko postrojenje radi na principu Joule-ovog, odnosno Brayton-ovog procesa sa dvije izobare i dvije izentrope. S obzirom da su kompresije i ekspanzije u postrojenju neravnotežni adijabatski procesi, teoretski gledano ne mogu biti izentrope, kao što to prikazuju idealni kružni procesi, koji su prikazani u T-s dijagramu za plinsko postrojenje (Slika 7).

4.2.1 OPTEREĆENJE I SNAGA PLINSKE TURBINE

Današnje plinske turbine imaju u najboljem slučaju 40 % termodinamički stupanj djelovanja, tako da se ostatak troši na kompresorski dio. S obzirom da je to nizak stupanj djelovanja, obavezno se koristi otpadna toplina koja se dalje u procesu iskorištava.

Minimalno opterećenje s kojim radi PTA je 60% od svoje nominalne snage. U dnevnom radu kada je skuplja tarifa električne energije, želimo maksimalno opteretiti turbinu na 100%, dok u noćnom radu na 60% kada je jeftina tarifa električne energije. Plinska turbina direktno ne ovisi o toplinskom konzumu, ali mora imati snagu da proizvodi dovoljnu količinu energije da zadovolji preko parne turbine toplinski konzum. U tom smislu je potrebno skalirati vrijednosti toplinskog konzuma da bi se matematičkim modelom dobile kompetitivne vrijednosti.

4.2.2 SNAGA PARNE TURBINE

Otpadna toplina koja je izvor topline za parno postrojenje mora biti dovoljno velika da se može proizvoditi električna i toplinska energija.

Električna snaga parne turbine koja se sastoji od visokotlačnog i niskotlačnog dijela pogonjena je vodenom parom koja se proizvodi u parnom kotlu na otpadnu toplinu HRSG i preko dva oduzimanja, paru odvodi za zagrijavanje mrežne vode i potrebe za industrijsku paru.

Parna turbina direktno ovisi o toplinskom konzumu i što je potreba za toplinom veća, parna turbina manje proizvodi električnu energiju na četkicama električnog generatora. S kakvom snagom će raditi parna turbina ovisi o opterećenju plinske turbine i potrebe za toplinom koju određuje realna krivulja toplinskog konzuma. Rad parne turbine je direktno ovisan o radu plinske turbine.

4.2.3 UKUPNA ELEKTRIČNA SNAGA

Ukupna električna snaga kogeneracijskog postrojenja s kombiniranim ciklusom je zbroj plinske i parne turbine i kao što je već spomenuto, ovisi o opterećenju plinske turbine i o toplinskom konzumu koji će direktno utjecati na snagu parne turbine.

Električna snaga koja se proizvodi u agregatima:

$$W_{uk} = W_{pl} + W_{pa}$$

Gdje su:

W_{uk}	[MW]	ukupna snaga turbina
W_{pl}	[MW]	snaga plinskih turbina
W_{pa}	[MW]	snaga parne turbine

4.2.4 PROIZVEDENA TOPLINA

Na osnovu realne krivulje toplinskog konzuma potrebno je odrediti ukupnu toplinsku snagu kroz cijelu godinu i to na način da se zbroji ukupna toplina u MWh koja je prikazana u datoteci '2009.konzum.xls'.

4.2.5 KORISNOST POSTROJENJA

Jedino izgaranje u ovom postrojenju se vrši u komori izgaranja plinskog postrojenja i to je jedina količina topline koja se dovodi cijelom kombiniranom postrojenju.

Upravo je to jedna od glavnih karakteristika postrojenja s HRSG kotlom na otpadnu toplotu, što se gotovo cijela količina topline koristi bez dodatnih izgaranja i trošenja goriva za proizvodnju vodene pare. Ovaj stupanj iskoristivosti ide preko 50%. Što je manji toplinski konzum, veća je korisnost postrojenja iz razloga što se više proizvodi električne energije.

Stupanj iskoristivosti postrojenja:

$$\eta_p = \frac{W_{pl} + W_{pa}}{Q_{dov}}$$

Ukupno dovedena toplota postrojenju:

$$Q_{dov} = Q_{pl}$$

Stupanj iskoristivosti plinskog postrojenja:

$$\eta_{pl} = \frac{W_{pl}}{Q_{pl}}$$

Ukupno dovedena toplota postrojenju:

$$Q_{pl} = \frac{W_{pl}}{\eta_{pl}}$$

Stupanj iskoristivosti postrojenja:

$$\eta_p = \frac{W_{uk}}{Q_{pl}}$$

Gdje su:	η_p	stupanj iskoristivosti kombiniranog postrojenja
	η_{pl}	stupanj iskoristivosti plinskog postrojenja
	W_{uk} [MW]	ukupna električna snaga
	Q_{pl} [MW]	toplinska snaga dovedena plinskom postrojenju

4.2.6 KORISNOST POSTROJENJA S PROIZVEDENOM TOPLINOM

U kogeneracijskim postrojenjima s kombiniranim ciklusom, osim što smo proizveli električnu energiju, uzevši u obzir zahtjeve za maksimalno proizvedenom u dnevnoj "vožnji" na maksimalnom opterećenju plinske turbine, cilj je da se zadovolji u svakom trenu potrebna količina topline. Ovaj stupanj iskoristivosti može dosegnuti i do 90%. Što je veći toplinski konzum, veća je korisnost postrojenja s proizvedenom toplinom.

Stupanj iskoristivosti postrojenja:

$$\eta_{p+Q} = \frac{W_{uk} + Q}{Q_{pl}}$$

Gdje su:

η_{p+Q}	stupanj iskoristivosti kombiniranog postrojenja s proizvedenom toplinom
W_{uk} [MW]	ukupna električna snaga
Q [MW]	toplinski konzum
Q_{pl} [MW]	dovedena toplota primarnom postrojenju

4.3 Model s dvije male plinske turbine

U matematičkom modelu s dvije male plinske turbine treba na što efikasniji, optimalan način prikazati rad plinskih turbina koje pokreću i daju ritam rada cijelog postrojenja. I dalje imamo jedan kotao na otpadnu toplotu HRSG i jednu parnu turbinu.

Oba plinska postrojenja rade na principu Joule-ovog odnosno Brayton-ovog procesa s dvije izobare i dvije adijabate.

4.3.1 OPTEREĆENJE I SNAGA PLINSKIH TURBINA

Minimalno opterećenje s kojim radi PTA je 60% od svoje nominalne snage. Opterećenje je podijeljeno po 5% i prikazuje parametre i potrošnju goriva za određenu temperaturu okoliša.

U dnevnom radu kada je najveća tarifa električne energije, želimo maksimalno opteretiti obje turbine, dok u noćnom radu za vrijeme najmanje tarife električne energije, želimo minimalno opteretiti i to na 60% jednu turbinu za potrebe toplinskog konzuma, a drugu pokrećemo po potrebi toplinskog konzuma. Plinska turbina direktno ne ovisi o toplinskom konzumu, ali mora imati tu snagu da proizvodi dovoljnu količinu otpadne toplinske energije za potrebe rada parne turbine koja proizvodi zasebno električnu energiju i oduzimanjem pare nadoknađuje toplinski konzum.

4.3.2 SNAGA PARNE TURBINE

Otpadna toplota plinskih turbina, koja je izvor topline za parno postrojenje, mora biti dovoljno velika da se može proizvoditi električna i toplinska energija.

Parna turbina direktno ovisi o toplinskom konzumu i što je potreba za toplinom veća, parna turbina manje proizvodi električnu energiju na četkicama električnog generatora. S kakvom snagom će raditi parna turbina ovisi o opterećenju malih plinskih turbina i s obzirom na potrebe za toplinom koju određuje realna krivulja toplinskog konzuma, u ovom modelu će se puno manje goriva potrošiti jer će sveukupna dovedena toplinska snaga biti manja, što se nadovezuje na manju otpadnu toplinsku snagu i samim time manju električnu snagu parne turbine. Dnevni i noćni rad parne turbine je direktno ovisan o radu plinskih turbina.

4.3.3 UKUPNA ELEKTRIČNA SNAGA

Ukupna električna snaga kogeneracijskog postrojenja s kombiniranim ciklusom je zbroj plinskih i parne turbine i kao što je već spomenuto, ovisi o opterećenju plinskih turbina i o toplinskom konzumu koji će direktno utjecati na snagu parne turbine.

Električna snaga koja se proizvodi u agregatima:

$$W_{uk} = W_{pl} + W_{pa}$$

Gdje su:

W_{uk}	[MW]	ukupna snaga turbina
W_{pl}	[MW]	snaga plinskih turbina
W_{pa}	[MW]	snaga parne turbine

4.3.4 PROIZVEDENA TOPLINA

Na osnovu realne krivulje toplinskog konzuma potrebno je odrediti ukupnu toplinsku snagu kroz cijelu godinu i to na način da se zbroji ukupna toplina u MWh koja je prikazana u datoteci '2009.konzum.xls'.

4.3.5 KORISNOST POSTROJENJA

S obzirom da je jedna od glavnih karakteristika postrojenja s HRSG kotlom na otpadnu toplinu, što se gotovo cijela količina topline koristi bez dodatnih izgaranja i trošenja goriva za proizvodnju vodene pare, u ovom modelu ćemo potrošiti bitno manje goriva zbog isprekidanog rada druge manje turbine.

Stupanj iskoristivosti postrojenja:

$$\eta_P = \frac{W_{pl} + W_{pa}}{Q_{dov}}$$

Ukupno dovedena toplotina postrojenju:

$$Q_{dov} = Q_{pl}$$

Stupanj iskoristivosti plinskog postrojenja:

$$\eta_{pl} = \frac{W_{pl}}{Q_{pl}}$$

Ukupno dovedena toplotina postrojenju:

$$Q_{pl} = \frac{W_{pl}}{\eta_{pl}}$$

Stupanj iskoristivosti postrojenja:

$$\eta_P = \frac{W_{uk}}{Q_{pl}}$$

Gdje su:	η_P	stupanj iskoristivosti kombiniranog postrojenja
	η_{pl}	stupanj iskoristivosti plinskog postrojenja
	W_{uk} [MW]	ukupna električna snaga
	Q_{pl} [MW]	toplinska snaga dovedena plinskom postrojenju

4.3.6 KORISNOST POSTROJENJA S PROIZVEDENOM TOPLINOM

U kogeneracijskim postrojenjima s kombiniranim ciklusom, osim što smo proizveli električnu energiju, uzevši u obzir zahtjeve da je bude maksimalno proizvedeno u dnevnoj "vožnji" na maksimalnom opterećenju plinske turbine, cilj je da se zadovolji u svakom trenu potrebna količina topline. Ovaj stupanj iskoristivosti može dosegnuti i do 90%. Što je veći toplinski konzum, veća je korisnost postrojenja s proizvedenom toplinom.

Stupanj iskoristivosti postrojenja:

$$\eta_{p+Q} = \frac{W_{uk} + Q}{Q_{pl}}$$

Gdje su: η_{p+Q} stupanj iskoristivosti kombiniranog postrojenja s proizvedenom toplinom
 W_{uk} [MW] ukupna električna snaga
 Q [MW] toplinski konzum
 Q_{pl} [MW] dovedena toplina primarnom postrojenju

4.4 Model s noćnim radom vršnih kotlova

4.4.1 OPTEREĆENJE I SNAGA PLINSKE TURBINE

Za dnevni rad kad želimo da se proizvede najviše električne energije, plinska turbina radi sa 100% opterećenja i u tim uvjetima imamo dobit, no u slučaju da nam noćni rad donosi gubitke zbog jeftinije tarife, okrećemo se vršnim kotlovima koji proizvode toplinsku energiju za potrebe toplinskog konzuma.

4.4.2 SNAGA PARNE TURBINE

Kao što je prije navedeno parna turbina u slučaju gubitka po noći ispada iz rada, tako da proizvodi električnu energiju i količinu pare za potrebe toplinskog konzuma samo po danu kada je električna energija skuplja, a samim time isplativa tarifa.

4.4.3 UKUPNA ELEKTRIČNA SNAGA

Ukupna električna snaga kogeneracijskog postrojenja s kombiniranim ciklusom je zbroj plinske i parne turbine u dnevnom radu i kao što je već spomenuto, ovisi o opterećenju plinskih turbina i o toplinskom konzumu koji će direktno utjecati na snagu parne turbine.

Električna snaga koja se proizvodi u agregatima:

$$W_{uk} = W_{pl} + W_{pa}$$

Gdje su: W_{uk} [MW] ukupna snaga turbina
 W_{pl} [MW] snaga plinskih turbina
 W_{pa} [MW] snaga parne turbine

4.4.4 PROIZVEDENA TOPLINA

Na osnovu realne krivulje toplinskog konzuma potrebno je odrediti ukupnu toplinsku snagu kroz cijelu godinu i to na način da se zbroji ukupna toplina u MWh koja je prikazana u datoteci '2009.konzum.xls'.

5 REZULTATI MODELA

5.1 Polazni podaci

5.1.1 POLAZNI PODACI NA OSNOVU OPTEREĆENJA PLINSKE TURBINE I TOPLINSKE SNAGE

U zagrijaču mrežne vode koji se zagrijava direktno dimnim plinovima u utilizatoru postizemo vrijednosti toplinske snage približno 9 MW. U intervalu do 9 MW proizvedene topline na zagrijaču mrežne vode, kotao na otpadnu toplinu proizvodi besplatnu toplinsku energiju u smislu održanja maksimalne proizvodnje električne energije. Kada toplinski konzum postane veći od gore navedene vrijednosti, sveukupna električna snaga postrojenja počinje postupno opadati.

U donjoj tablici prikazani su polazni podaci za tri različite temperature okoliša u promjenljivom režimu opterećenja plinske turbine. Što je veće opterećenje, to je veća potrošnja goriva, ali i veća električna snaga plinskog agregata uz veći stupanj iskoristivosti i veći stupanj iskoristivosti sa proizvedenom toplinom. Električna snaga parne turbine je na maksimalnim vrijednostima, jer nema oduzimanja iz parne turbine i sva para se koristi za proizvodnju električne energije.

Tablica 2: Toplinska snaga u ZMV predana od dimnih plinova unutar HRSG

t_{ok} °C	η_{Pt} %	B kg/s	W_{Pl} MW	W_{Pa} MW	W_{uk} MW	η_P %	η_{P+Q} %	$t_{ul.Pt}$ °C	Q MW
-24									
0,6	29,96%	3,494	51,450	31,009	82,4587	48,02%	52,30%	1.142,790	7,347
0,65	31,08%	3,654	55,810	31,998	87,8078	48,89%	53,15%	1.156,725	7,644
0,7	32,13%	3,810	60,160	32,988	93,1481	49,74%	53,98%	1.174,680	7,924
0,75	32,96%	3,982	64,520	34,205	98,7246	50,44%	54,67%	1.188,960	8,269
0,8	33,83%	4,142	68,880	35,185	104,0643	51,11%	55,34%	1.201,501	8,594
0,85	34,53%	4,315	73,230	36,396	109,6254	51,68%	55,90%	1.209,449	8,947
0,9	35,13%	4,493	77,590	37,644	115,2339	52,18%	56,41%	1.217,040	9,332
0,95	35,58%	4,686	81,950	39,536	121,4863	52,75%	57,00%	1.218,710	9,781
1	36,20%	4,850	86,300	40,192	126,4923	53,06%	57,38%	1.203,754	10,292
15									
0,6	28,67%	3,178	44,780	29,330	74,1103	47,45%	51,87%	1.167,078	6,904
0,65	29,74%	3,323	48,580	30,359	78,9393	48,33%	52,75%	1.185,017	7,206
0,7	30,69%	3,472	52,380	31,498	83,8782	49,15%	53,55%	1.201,479	7,509
0,75	31,78%	3,596	56,180	32,203	88,3840	50,00%	54,38%	1.221,004	7,726
0,8	32,57%	3,747	59,980	33,328	93,3081	50,66%	55,02%	1.238,816	8,026
0,85	33,20%	3,908	63,780	34,602	98,3825	51,22%	55,58%	1.246,720	8,375
0,9	33,80%	4,068	67,580	35,861	103,4411	51,73%	56,10%	1.254,545	8,733
0,95	34,32%	4,231	71,380	37,615	108,9950	52,41%	56,79%	1.259,009	9,117
1	34,58%	4,423	75,180	39,600	114,7806	52,80%	57,12%	1.271,578	9,399
37									
0,6	26,70%	2,809	36,860	26,187	63,0463	45,67%	50,34%	1.172,526	6,439
0,65	27,69%	2,940	40,010	27,365	67,3751	46,63%	51,23%	1.195,769	6,652
0,7	28,53%	3,077	43,150	28,672	71,8213	47,49%	52,05%	1.214,835	6,885
0,75	29,55%	3,187	46,290	29,492	75,7811	48,37%	52,90%	1.235,496	7,085
0,8	30,32%	3,316	49,430	30,574	80,0038	49,08%	53,58%	1.253,781	7,341
0,85	31,11%	3,438	52,570	31,505	84,0745	49,75%	54,24%	1.268,780	7,580
0,9	31,79%	3,566	55,710	32,517	88,2262	50,34%	54,82%	1.279,601	7,850
0,95	32,28%	3,710	58,850	33,791	92,6414	50,81%	55,30%	1.286,304	8,195
1	32,61%	3,868	61,990	36,070	98,0595	51,58%	56,00%	1.300,294	8,397

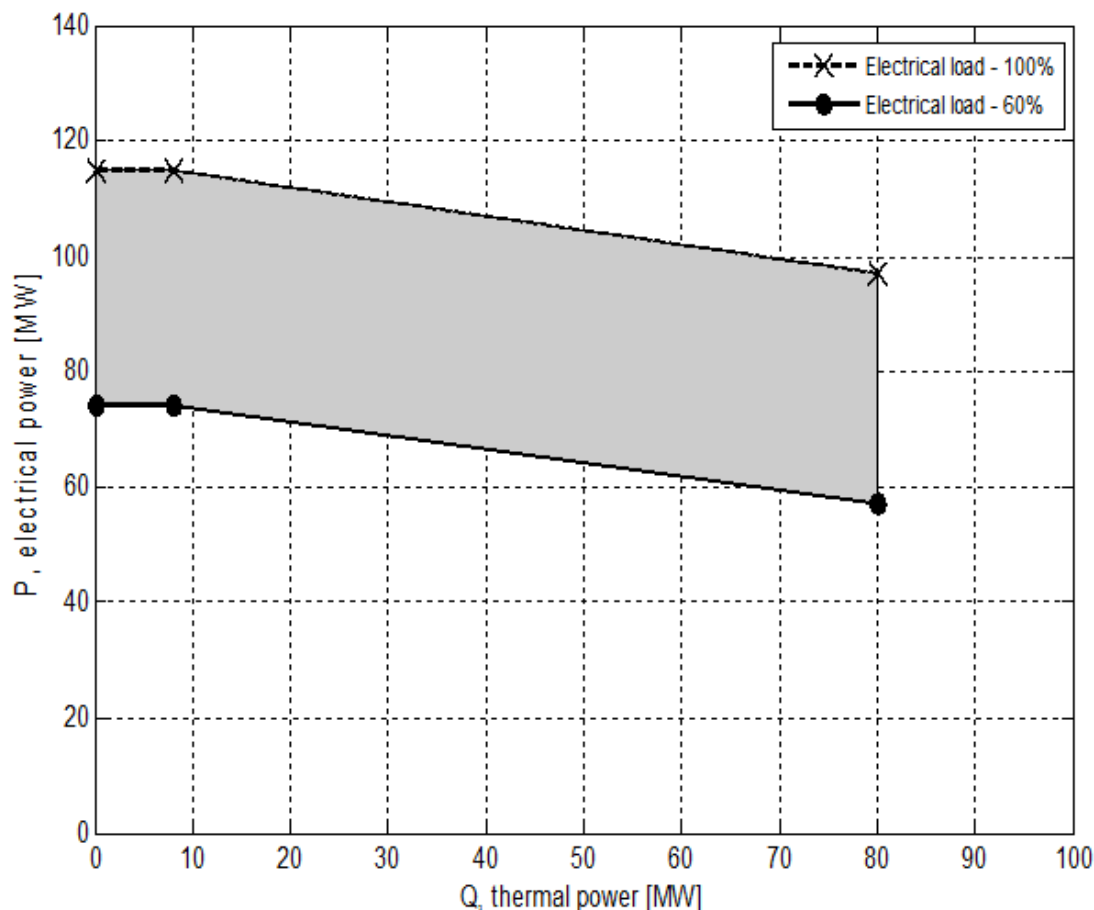
Maksimalni toplinski konzum 80 MW postižemo u zagrijaču mrežne vode, uključujući u sustav zagrijače mrežne vode ZMV C5 i ZMV C6, (Slika 4), koji toplinsku energiju dobivaju od oduzimanja pare iz parne turbine. Kotao na otpadnu toplinu proizvodi paru koja se transportira do parne turbine, smanjujući na minimum sveukupnu proizvodnju električne energije, a oduzimanjem pare iz turbine, povećava toplinski konzum do maksimuma. Smanjenje proizvodnje električne energije se očituje u snazi električne energije parne turbine.

U donjoj tablici prikazani su polazni podaci za tri različite temperature okoliša u promjenljivom režimu opterećenja plinske turbine. Što je veće opterećenje, to je veća potrošnja goriva, ali i veća električna snaga plinskog agregata uz veći stupanj iskoristivosti, ali i manji stupanj iskoristivosti sa proizvedenom toplinom. Električna snaga parne turbine je na minimalnim vrijednostima, jer imamo maksimalno oduzimanje iz parne turbine i samo dio pare se koristi za proizvodnju električne energije, što direktno utječe na smanjenje električne snage parne turbine.

U prije spomenutom modelu dviju malih turbina, za svaku malu turbinu pojedinačno, smatramo da su polazni podaci jednaki što se tiče svih prikazanih stupnjeva iskoristivosti, temperature okoliša i dimnih plinova, dok se prikazane veličine, kao količina goriva, toplinska snaga i sve prikazane električne snage, dijele na polovinu vrijednosti jedne velike turbine.

Tablica 3: Maksimalna toplinska snaga

t_{ok} °C	η_{Pt} %	B kg/s	W_{Pt} MW	W_{Pa} MW	W_{uk} MW	η_P %	η_{P+Q} %	$t_{ul,Pt}$ °C	Q MW
-24									
0,6	29,96%	3,494	51,450	12,856	64,30594312	37,45%	84,04%	1.142,790	80
0,65	31,08%	3,654	55,810	13,870	69,67952819	38,80%	83,34%	1.156,725	80
0,7	32,13%	3,810	60,160	14,710	74,86995645	39,98%	82,70%	1.174,680	80
0,75	32,96%	3,982	64,520	15,735	80,2543174	41,00%	81,88%	1.188,960	80
0,8	33,83%	4,142	68,880	16,585	85,46464376	41,98%	81,27%	1.201,501	80
0,85	34,53%	4,315	73,230	17,697	90,92680634	42,87%	80,59%	1.209,449	80
0,9	35,13%	4,493	77,590	18,903	96,4928709	43,69%	79,92%	1.217,040	80
0,95	35,58%	4,686	81,950	20,387	102,3364369	44,43%	79,17%	1.218,710	80
1	36,20%	4,850	86,300	21,053	107,3530752	45,04%	78,60%	1.203,754	80
15									
0,6	28,67%	3,178	44,780	12,713	57,49310176	36,81%	88,04%	1.167,078	80
0,65	29,74%	3,323	48,580	13,527	62,10718595	38,03%	87,01%	1.185,017	80
0,7	30,69%	3,472	52,380	14,513	66,89378114	39,20%	86,07%	1.201,479	80
0,75	31,78%	3,596	56,180	15,028	71,20852172	40,29%	85,55%	1.221,004	80
0,8	32,57%	3,747	59,980	15,975	75,95500704	41,24%	84,68%	1.238,816	80
0,85	33,20%	3,908	63,780	17,110	80,89016168	42,11%	83,75%	1.246,720	80
0,9	33,80%	4,068	67,580	18,282	85,86205856	42,94%	82,95%	1.254,545	80
0,95	34,32%	4,231	71,380	19,547	90,92751502	43,72%	82,19%	1.259,009	80
1	34,58%	4,423	75,180	21,569	96,74974628	44,50%	81,30%	1.271,578	80
37									
0,6	26,70%	2,809	36,860	11,658	48,51776454	35,15%	90,20%	1.172,526	80
0,65	27,69%	2,940	40,010	12,417	52,4270333	36,28%	89,57%	1.195,769	80
0,7	28,53%	3,077	43,150	13,026	56,17577581	37,15%	90,05%	1.214,835	80
0,75	29,55%	3,187	46,290	13,591	59,88081381	38,22%	89,29%	1.235,496	80
0,8	30,32%	3,316	49,430	14,409	63,83943403	39,16%	88,24%	1.253,781	80
0,85	31,11%	3,438	52,570	15,129	67,69825796	40,06%	87,40%	1.268,780	80
0,9	31,79%	3,566	55,710	15,945	71,65456332	40,88%	86,53%	1.279,601	80
0,95	32,28%	3,710	58,850	17,057	75,90785992	41,63%	85,50%	1.286,304	80
1	32,61%	3,868	61,990	18,704	80,69398066	42,45%	84,53%	1.300,294	80



Slika 14: Radno područje kogeneracijskog postrojenja TE-TO Zagreb-blok L³

S obzirom da je rad plinske turbine ovisan o ulaznoj temperaturi okoliša, trebalo je prilagoditi rad turbine na određenim opterećenjima.

Na slici (Slika 14) je prikazano radno područje kogeneracijskog postrojenja s kombiniranim ciklusom TE-TO Zagreb blok L, za matematički model na kojem je prikazana funkcijska veza sveukupne električne energije o toplinskom konzumu, na temperaturi okoliša $t_{ok} = 15^\circ\text{C}$. Treba napomenuti da svaki termoenergetski blok ima karakteristično radno područje.

S obzirom da se temperatura okoliša intenzivno mijenja, odnosno varira, promatramo je kao nezavisnu varijablu ovisnu o vanjskim uvjetima, koju moramo prikazati funkcijskom vezom sveukupne električne snage kao zavisne varijable unutar energetskeg sustava, koja eksplicitno zavisi o varijabli t_{ok} .

Upravo u datoteci 'Diplomski rad.xlsm' su izračunate vrijednosti električne snage i količine goriva za izgaranje u plinskom postrojenju u ovisnosti zadanog realnog toplinskog konzuma za realne temperature okoliša koje se intenzivno mijenjaju svakih sat vremena tijekom cijele godine.

³ katedra za energetska postrojenja, FSB Zagreb

5.1.2 POLAZNI EKONOMSKI PODACI

Svi rezultati ovise o vrijednostima koje su zadane u svrhu ovog diplomskog rada. Te vrijednosti su prikazane u tablici (Tablica 4).

Tablica 4: *Standardne vrijednosti za proračun*

Naziv	Vrijednost	jedinica
Struja dnevna tarifa:	100	€/MWh
Struja noćna tarifa:	50	€/MWh
Toplina:	45	€/MWh
Zemni plin:	12	€/GJ
Ogrjevna vrijednost:	0,049151	GJ/kg

Polazni podaci mada određeni za svrhu ovog diplomskog rada imaju svoju stvarnu utemeljenost na realnim parametrima iz svakodnevnog života, a u vrijeme pisanja ovog diplomskog rada.

Ovi podaci uvelike određuju rezultate ove studije, oni također upućuju na nedosljednost njihovih ekonomskih veličina kao što će biti prikazano u poglavljima 5.2.4 i 5.3.5. Poznato je da su energenti uvelike podložni burzovnom mešetarenju, raznim političkim utjecajima a vrlo rijetko stvarnim ekonomskim parametrima.

5.2 Varijanta I

Varijanta I prikazuje ekonomsku usporedbu modela velike turbine i dviju malih plinskih turbina za vrijeme rada u skupljaj i jeftinoj tarifi.

5.2.1 POTROŠNJA GORIVA

Potrošnja goriva je podijeljena, posebno za dnevni i noćni rad postrojenja. Na osnovu izračunatih vrijednosti količine goriva za godišnju potrošnju možemo izračunati ukupni trošak:

$$G_{\epsilon} = C_G \cdot H_d \cdot m_G$$

Gdje su:

G_{ϵ}	[€]	godišnji trošak goriva
C_G	[€/GJ]	cijena goriva
H_d	[GJ/kg]	ogrjevnost vrijednost zemnog plina
m_G	[kg]	godišnja količina goriva

Cijena goriva je fiksna i prikazana je u tablici (Tablica 4).

Tablica 5: Trošak goriva

	Trošak goriva		
	Dnevna	Noćna	Ukupno
Plinska Velika Turbina	45.941.174 €	24.170.162 €	70.111.337 €
1. Plinska mala turbina	22.970.587 €	12.085.081 €	35.055.668 €
2. Plinska mala turbina	22.970.587 €	618.184 €	23.588.771 €
2 Male plinske turbine	45.941.174 €	12.703.265 €	58.644.439 €

5.2.2 DOBIT IZ TOPLINSKOG KONZUMA

Toplinski konzum je također podijeljen, posebno za dnevni i noćni rad postrojenja. Na osnovu izračunatih vrijednosti toplinskog konzuma za godišnju potrebu možemo izračunati dobit:

$$Q_{\epsilon} = C_Q \cdot E_Q$$

Gdje su:

Q_{ϵ}	[€]	godišnja dobit od proizvedenog toplinskog konzuma
C_Q	[€/MWh]	cijena topline
E_Q	[MWh]	godišnja proizvedena toplinska energija

Cijena toplinskog konzuma je fiksna i prikazana je u tablici (Tablica 4).

Tablica 6: Dobit iz toplinskog konzuma

	Dobit iz toplinskog konzuma		
	Dnevna	Noćna	Ukupno
Plinska Velika Turbina	4.506.312 €	2.394.083 €	6.900.396 €
1. Plinska mala turbina	2.253.156 €	2.198.361 €	4.451.518 €
2. Plinska mala turbina	2.253.156 €	195.722 €	2.448.878 €
2 Male plinske turbine	4.506.312 €	2.394.083 €	6.900.396 €

5.2.3 DOBIT IZ PROIZVODNJE ELEKTRIČNE ENERGIJE

Električna energija je podijeljena, posebno za dnevni i noćni rad postrojenja. Na osnovu izračunatih vrijednosti proizvedene električne energije za godišnju potrebu možemo izračunati dobit:

$$E_{\epsilon} = E_{DT\epsilon} + E_{NT\epsilon}$$

Cijena električne energije za skuplju ili dnevnu tarifu prikazana je u tablici (Tablica 4).

$$E_{DT\epsilon} = C_{DT} \cdot E_{DT}$$

Cijena električne energije za jeftinu ili noćnu tarifu prikazana je u tablici (Tablica 4).

$$E_{NT\epsilon} = C_{NT} \cdot E_{NT}$$

Gdje su:

E_{ϵ}	[€]	godišnja dobit od proizvedene električne energije
$E_{DT\epsilon}$	[€]	godišnja dobit od proizvedene dnevne elektr. energije
$E_{NT\epsilon}$	[€]	godišnja dobit od proizvedene noćne elektr. energije
E_{DT}	[MWh]	proizvedena električna energija u dnevnoj tarifi
C_{DT}	[€/MWh]	cijena skuplje tarife električne energije
E_{NT}	[MWh]	proizvedena električna energija u noćnoj tarifi
C_{NT}	[€/MWh]	cijena jeftine tarife električne energije

Tablica 7: Dobit iz proizvodnje električne energije

	Dobit iz proizvodnje električne energije		
	Dnevna	Noćna	Ukupno
Plinska Velika Turbina	54.383.315 €	12.972.120 €	67.355.435 €
1. Plinska mala turbina	27.191.657 €	6.223.771 €	33.415.428 €
2. Plinska mala turbina	27.191.657 €	297.554 €	27.489.211 €
2 Male plinske turbine	54.383.315 €	6.521.324 €	60.904.639 €

5.2.4 UKUPNA DOBIT

Ukupna dobit je prikazana u tablici (Tablica 8) i na osnovu prije izračunatih vrijednosti dobitka u proizvedenoj električnoj energiji toplinskom konzumu uz trošak goriva, možemo izračunati ukupnu dobit:

$$D_{\epsilon} = E_{\epsilon} + Q_{\epsilon} - G_{\epsilon}$$

Gdje su:

D_{ϵ}	[€]	ukupna godišnja dobit
E_{ϵ}	[€]	godišnja dobit od proizvedene električne energije
Q_{ϵ}	[€]	godišnja dobit od proizvedenog toplinskog konzuma
G_{ϵ}	[€]	godišnji trošak goriva

Ukupna dobit prikazuje veliku ekonomsku razliku između dva modela.

Tablica 8: *Ukupna dobit*

	Ukupna dobit
	Ukupno
Plinska Velika Turbina	4.144.494 €
1. Plinska mala turbina	2.811.277 €
2. Plinska mala turbina	6.349.319 €
2 Male plinske turbine	9.160.596 €

Ukupna dobit uvelike ovisi o prije navedenim ekonomskim faktorima.

5.3 Varijanta II

Varijanta II prikazuje ekonomsku usporedbu modela velike turbine i dviju malih plinskih turbina za vrijeme rada u skupljoj tarifi, s uvođenjem vršnih kotlova za vrijeme jeftine tarife s ciljem smanjenja troškova i povećanja dobitka.

5.3.1 POTROŠNJA GORIVA U VRŠNIM KOTLOVIMA

Na osnovu stupnja korisnosti vršnog kotla od 0,85, izračunat je trošak goriva za vrijeme jeftine tarife, koji je potreban da se proizvede toplinski konzum.

Potrebna godišnja proizvedena toplinska energija vršnog kotla za noćni rad:

$$E_{QVK} = \frac{E_{QN}}{\eta_{VK}}$$

Potrebna godišnja količina goriva:

$$m_{GVK} = E_{QVK} \cdot \frac{3.6}{H_d}$$

Trošak goriva za potrebe vršnog kotla:

$$G_{\epsilon} = C_G \cdot H_d \cdot m_{GVK}$$

Gdje su:	G_{ϵ}	[€]	godišnji trošak goriva u vršnom kotlu
	C_G	[€/GJ]	cijena goriva
	H_d	[GJ/kg]	ogrjevnost zemnog plina
	m_{GVK}	[kg]	godišnja količina goriva za potrebe vršnog kotla
	E_{QVK}	[MWh]	godišnje proizvedena toplina u noćnom radu
	E_{QN}	[MWh]	godišnji toplinski konzum u noćnom radu
	η_{VK}	[-]	stupanj iskoristivosti vršnog kotla

Cijena goriva je fiksna i prikazana je u tablici (Tablica 4).

Tablica 9: Trošak goriva u vršnim kotlovima VK

Vršni kotao kao ALTERNATIVA za noćni rad	Trošak goriva u vršnim kotlovima VK				
	Q_{ϵ}	E_Q	E_{QVK}	m_{GVK}	$Q_{\epsilon VK}$
	[€]	[MWh]	[MWh]	[kg/god.]	[€]
Plinska Velika Turbina	2.394.083 €	53.202	62.590	4.584.352	2.703.906 €
1. Plinska mala turbina	2.198.361 €	48.852	57.474	4.209.571	2.482.855 €
2. Plinska mala turbina	195.722 €	4.349	5.117	374.781	221.051 €
2 Male plinske turbine	2.394.083 €	53.202	62.590	4.584.352	2.703.906 €

5.3.2 POTROŠNJA GORIVA

Uzevši u obzir ukupno dnevni rad s turbinama i noćni rad s vršnim kotlovima možemo prikazati ukupnu godišnju potrošnju goriva u tablici (Tablica 10).

Tablica 10: *Trošak goriva*

	Trošak goriva		
	Dnevna	Noćna	Ukupno
Plinska Velika Turbina	45.941.174 €	2.703.906 €	48.645.080 €
1. Plinska mala turbina	22.970.587 €	2.482.855 €	25.453.442 €
2. Plinska mala turbina	22.970.587 €	221.051 €	23.191.638 €
2 Male plinske turbine	45.941.174 €	2.703.906 €	48.645.080 €

5.3.3 DOBIT IZ TOPLINSKOG KONZUMA

Toplinski konzum je također podijeljen, posebno za dnevni i noćni rad postrojenja. Na osnovu izračunatih vrijednosti toplinskog konzuma za godišnju potrebu možemo izračunati dobit:

$$Q_{\epsilon} = C_Q \cdot E_Q$$

Gdje su: Q_{ϵ} [€] godišnja dobit od proizvedenog toplinskog konzuma
 C_Q [€/MWh] cijena topline
 E_Q [MWh] godišnja proizvedena toplinska energija

Cijena toplinskog konzuma je fiksna i prikazana je u tablici (Tablica 4).

Tablica 11: *Dobit iz toplinskog konzuma*

	Dobit iz toplinskog konzuma		
	Dnevna	Noćna	Ukupno
Plinska Velika Turbina	4.506.312 €	2.394.083 €	6.900.396 €
1. Plinska mala turbina	2.253.156 €	2.198.361 €	4.451.518 €
2. Plinska mala turbina	2.253.156 €	195.722 €	2.448.878 €
2 Male plinske turbine	4.506.312 €	2.394.083 €	6.900.396 €

5.3.4 DOBIT IZ PROIZVODNJE ELEKTRIČNE ENERGIJE

Električna energija je prikazana u varijanti II samo za dnevni rad postrojenja. Na osnovu izračunatih vrijednosti proizvedene električne energije za godišnju potrebu možemo izračunati dobit:

$$E_{DT\epsilon} = C_{DT} \cdot E_{DT}$$

Gdje su: $E_{DT\epsilon}$ [€] godišnja dobit od proizvedene dnevne elektr. energije
 C_{DT} [€/MWh] cijena skuplje tarife električne energije
 E_{DT} [MWh] proizvedena električna energija u dnevnoj tarifi

Cijena električne energije za skuplju ili dnevnu tarifu prikazana je u tablici (Tablica 4).

Tablica 12: Dobit iz električne energije

	Dobit iz proizvodnje električne energije		
	Dnevna	Noćna	Ukupno
Plinska Velika Turbina	54.383.315 €	-	54.383.315 €
1. Plinska mala turbina	27.191.657 €	-	27.191.657 €
2. Plinska mala turbina	27.191.657 €	-	27.191.657 €
2 Male plinske turbine	54.383.315 €	-	54.383.315 €

5.3.5 UKUPNA DOBIT

Ukupna dobit uvelike ovisi o prije navedenim ekonomskim faktorima.

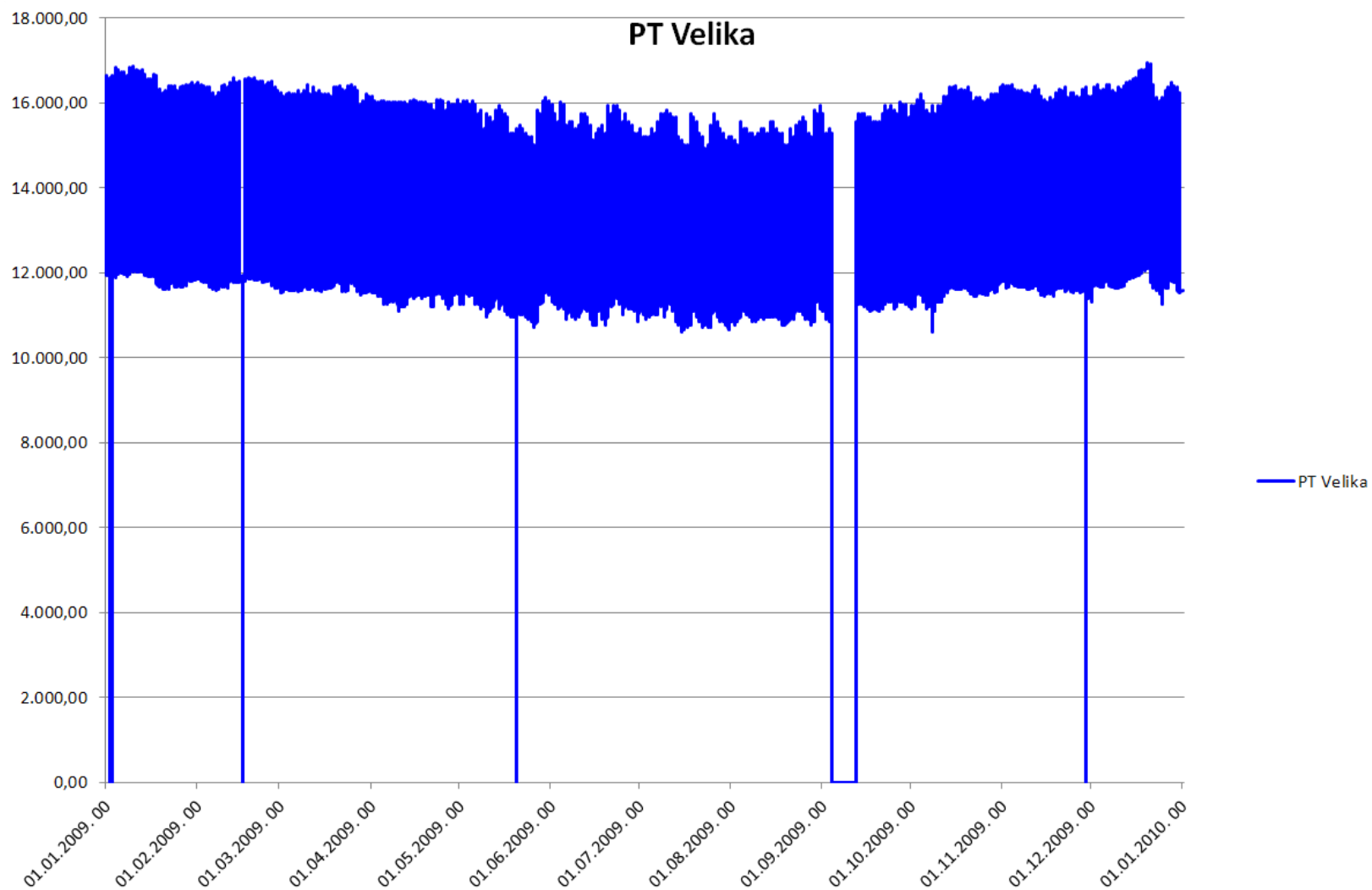
$$D_{\epsilon} = E_{DT\epsilon} + Q_{\epsilon} - G_{\epsilon}$$

Gdje su: D_{ϵ} [€] ukupna godišnja dobit
 $E_{DT\epsilon}$ [€] godišnja dobit od proizvedene dnevne elektr. energije
 Q_{ϵ} [€] godišnja dobit od proizvedenog toplinskog konzuma
 G_{ϵ} [€] godišnji trošak goriva

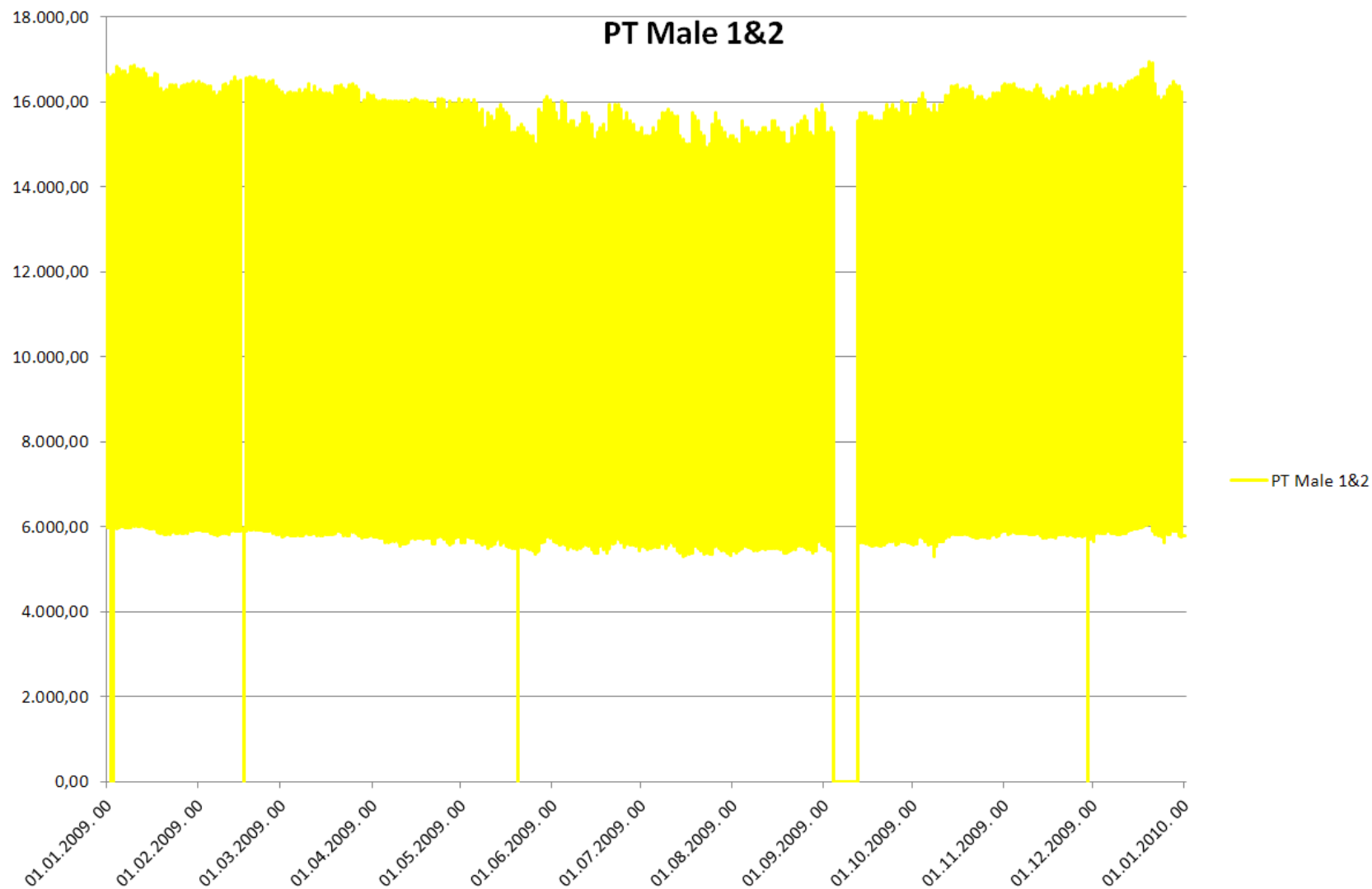
Vidimo iz rezultata da u varijanti II ukupna dobit ne ovisi o tipu modela.

Tablica 13: Ukupna dobit

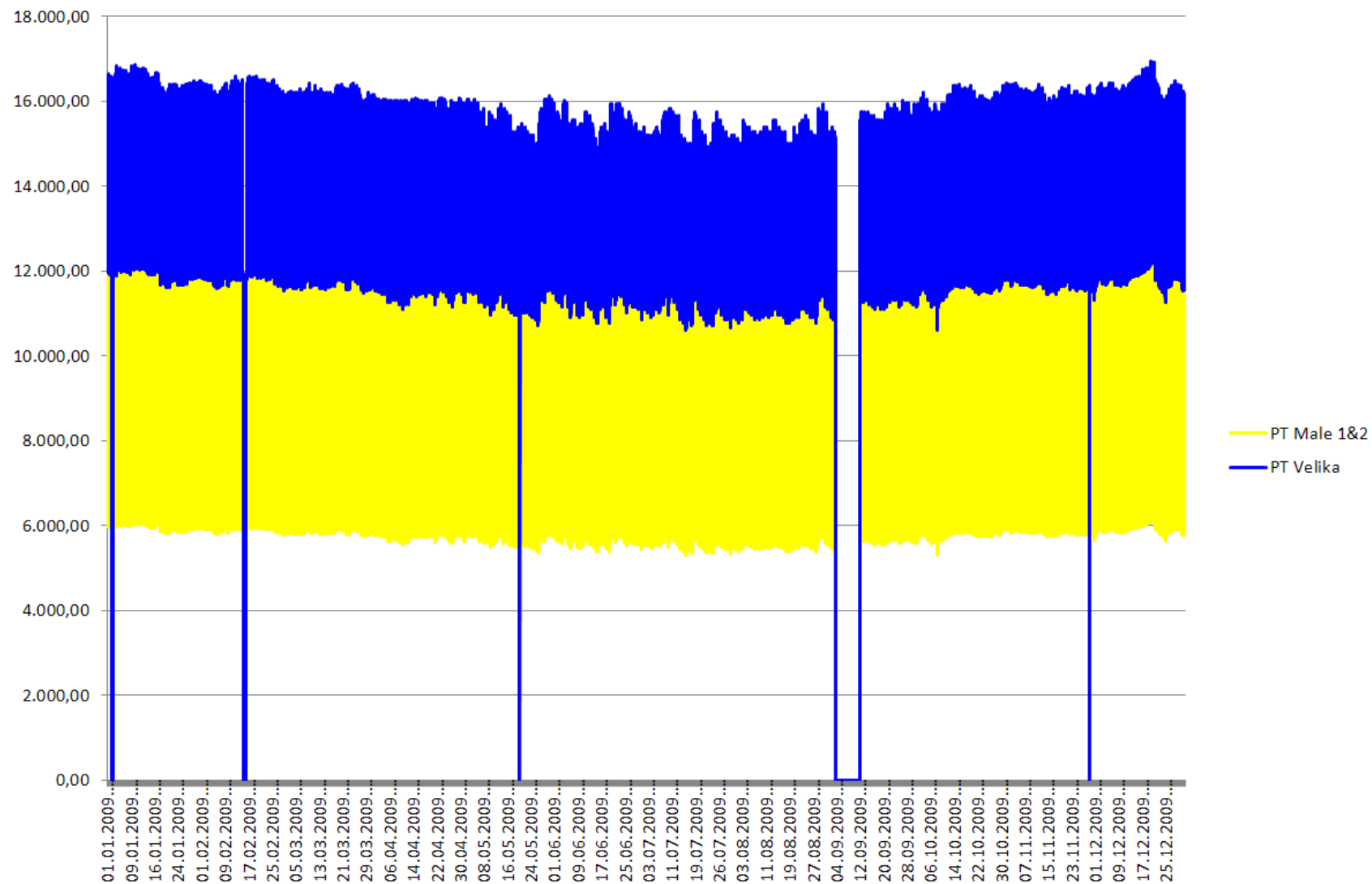
Vršni kotao kao	Ukupna dobit
ALTERNATIVA	Ukupno
Plinska Velika Turbina	12.638.630€
1. Plinska mala turbina	6.189.733 €
2. Plinska mala turbina	6.448.898 €
2 Male plinske turbine	12.638.630 €



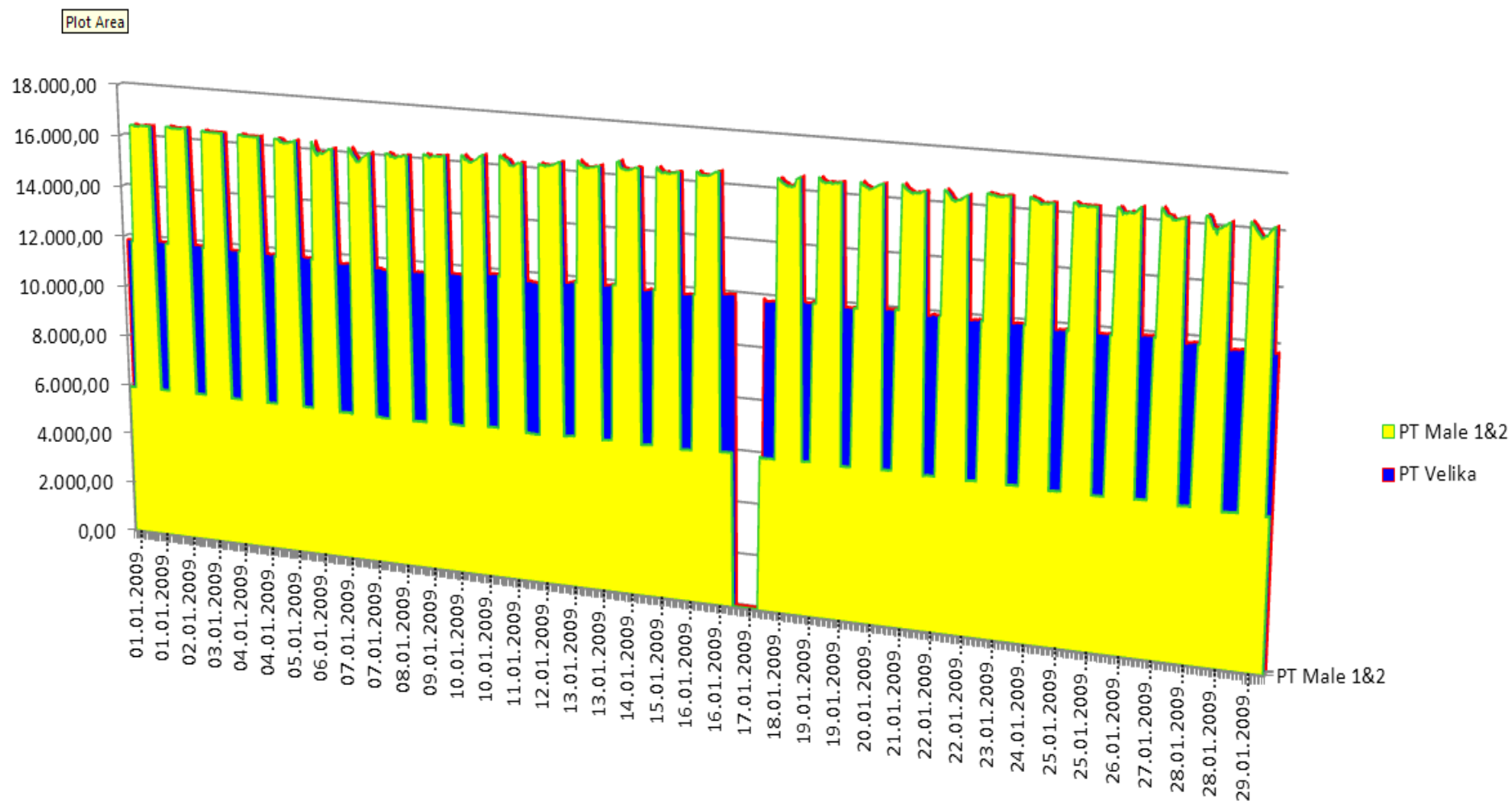
Slika 15: Rezultati ukupne potrošnje goriva za model s velikom plinskom turbinom



Slika 16: Rezultati ukupne potrošnje goriva za model s dvije male plinske turbine



Slika 17: Usporedni rezultati ukupne potrošnje goriva za modele



Slika 18: Detalj prikaza usporedne potrošnje goriva 1.1.2009 – 31.1.2009.

6 ANALIZA REZULTATA

Na osnovu rezultata koji su izračunati u datoteci 'Diplomski rad.xlsm', a prikazani u poglavlju 'Rezultati modela', vršimo usporedbu rezultata varijanti, koja je dana u donjoj tablici.

Matematički model s velikom plinskom turbinom u varijanti I donosi godišnju dobit **4.144.494 €**, proizvodeći električnu energiju na maksimalnom opterećenju u skupljoj tarifi i na minimalnom opterećenju po jeftinoj tarifi, pri tome zadovoljavajući realnu godišnju krivulju toplinskog konzuma.

Model s dvije male plinske turbine u varijanti I donosi godišnju dobit **9.160.596 €**, proizvodeći električnu energiju na maksimalnom opterećenju obje turbine u skupljoj tarifi u istom iznosu kao i velika turbina i na minimalnom opterećenju po jeftinoj tarifi, jedne turbine i po potrebi toplinskog konzuma uspostavlja se rad druge turbine, pri tome zadovoljavajući realnu godišnju krivulju toplinskog konzuma.

Noćni rad ili rad u uvjetima jeftinije tarife, rezultira gubitkom za oba modela. Rezultati su prikazani u prijašnjem poglavlju. Velika razlika između dnevne i noćne tarife u cijeni električne energije i fiksna cijena goriva su glavni uzrok tome.

Razlika u dobiti je očigledno u korist malih turbina jer je noćna potrošnja goriva bitno manja od potrošnje goriva velike turbine. To što je više električne energije proizvedeno sa velikom turbinom za vrijeme jeftine tarife, donosi manji pozitivni prirast u odnosu na veći negativni efekt zbog veće količine i troška goriva. Toplinski konzum za oba modela ima istu dobit, kao što je već spomenuto.

Tablica 14: Usporedba rezultata

	Usporedba rezultata Varijanti I & II		
	Varijanta II	Varijanta I	Povećanje dobiti
Plinska Velika Turbina	12.638.630 €	4.144.494 €	8.494.136 €
1. Plinska mala turbina	6.189.733 €	2.811.277 €	3.378.455 €
2. Plinska mala turbina	6.448.898 €	6.349.319 €	99.579 €
2 Male plinske turbine	12.638.630 €	9.160.596 €	3.478.034 €

Dnevni rad turbina u bilo kojem matematičkom modelu, s obzirom da rade na maksimalnom opterećenju i proizvode u skupljoj tarifi maksimalnu količinu električne energije, daje zadovoljavajuće rezultate dobiti.

Pri radu malih turbina povećali smo dobit sveukupno gledano, ali je noćni rad i dalje problematičan i zbog gore navedenih razloga, moramo tražiti bolja rješenja, odnosno smanjenje gubitaka.

Jedan od načina je uvođenje vršnih kotlova za vrijeme jeftine tarife gdje smanjujemo troškove tako da turbine zaustavljaju svoj noćni rad i minimalnom potrošnjom goriva proizvodimo noćni toplinski konzum i time bitno smanjujemo gubitke

U varijanti II za noćne potrebe toplinskog konzuma uvodimo vršne kotlove i u kombinaciji dnevnog rada s velikom turbinom stvaramo dobit **12.638.630 €**, što rezultira povećanjem dobiti **8.494.136 €**, dok u kombinaciji s malim turbinama po skupljoj tarifi i uvođenjem vršnih kotlova u noćnom radu stvaramo istu dobit **12.638.630 €**, kao i dnevni rad velike turbine, što također rezultira povećanjem dobiti **3.478.034 €**.

7 ZAKLJUČAK

Matematički model kogeneracijskog postrojenja s kombiniranim ciklusom prikazuje očekivane rezultate po pitanju usporedbe između modela s velikom turbinom i s dvije male plinske turbine. Treba napomenuti da dobivene rezultate u matematičkom modelu treba shvatiti okvirno.

Analizirajući dobivene rezultate, zaključujemo da u dnevnom radu, po matematičkom modelu, nema razlike u načinu rada i samog opterećenja plinskih turbina. I u jednom i u drugom slučaju imamo jednake odnose u proizvodnji električne energije, proizvedenog toplinskog konzuma i troškove goriva. Treba napomenuti da u stvarnom slučaju, za istu proizvedenu električnu energiju i toplinu, pogonski troškovi bi se razlikovali, iz razloga jer promjenljivi režim rada plinske turbine stvara dodatne troškove goriva, kao i dodatni investicijski trošak u samom postrojenju.

U noćnom radu ili za vrijeme jeftine tarife, oba modela rade s gubitkom, bez obzira što rade na minimalnom opterećenju kako bi maksimalno smanjili troškove goriva i to je upravo temeljni problem, što najviše iz ekonomskih razloga, ne možemo postići željenu efikasnost koju donosi model sa dvije male plinske turbine. Naravno, pod uvjetom da i po noći proizvodimo električnu energiju i toplinu, a da radimo sa dobiti. Uvođenjem vršnih kotlova u noćnom radu, nemamo noćnu proizvodnju električne energije i bitno smanjujemo troškove proizvodeći samo toplinski konzum.

S obzirom da je cilj da proizvodimo električnu energiju tijekom dvadeset i četiri sata dnevno, ne možemo biti zadovoljni sa prekidom noćne proizvodnje električne energije, a da bi u tim uvjetima poslovali pozitivno.

Naravno da postoji jednostavno rješenje, a to je usklađivanje cijene goriva i cijene tarifa električne energije, ali s obzirom da postoje raznorazne interesne sfere, što opravdane, što neopravdane, to ni približno nije moguće riješiti na jednostavan način.

Ono što preostaje u ovakvim ekonomskim odnosima je potraga za novim tehničkim rješenjima. U svakom slučaju rad sa više termo blokova daje veću fleksibilnost i veću dobit, kao i uštedu u gorivu, samim time i ekološku opravdanost u odnosu na rad jednog termoenergetskog bloka.

8 LITERATURA

- [1] Kreuh L., Generatori pare, Školska knjiga, Zagreb, 1978.
- [2] Bogdan Ž., Mogućnost optimiranja pogona EL-TO Zagreb, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, travanj 2001.
- [3] Čehil M., Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb.
- [4] Andrzej W. Ordys & Michael J. Grimble, Combined cycle and combined heat and power processes, University of Strathclyde, Glasgow, UK.
- [5] Slika 1 se nalazi na adresi:
<http://www.utilities-me.com/article-2121-ge-announces-12bn-in-new-orders/#.UdXikW1n2TR>
- [6] Slika 3 se nalazi na adresi:
http://www.siemens.com/press/en/presspicture/?press=/en/presspicture/2009/fossil_power_generation/efpg20030501-01.htm
- [7] Slika 5 se nalazi na adresi:
<http://www.power-eng.com/articles/print/volume-114/issue-8/Features/gas-fired-turbines.html>
- [8] Slika 8 se nalazi na adresi: <http://www.flickr.com/photos/tectrapro/4815680340/>
- [9] Slika 11 se nalazi na adresi:
http://www.ge-energy.com/products_and_services/products/steam_turbines/combined_cycle_a_series.jsp